

30-0114/001

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. DR.-ING. E. h. K. KORDINA · PROF. DR.-ING. F. S. ROSTÁSY

Abschließender Sachbericht

Verhalten von Beton unter Einwirkung  
flüssiger Metalle

---

von

Dipl.-Phys. Chr. Ehm

Prof. Dr.-Ing. U. Schneider

Dezember 1982

**BIBLIOTHEK**  
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
der Technischen Universität Braunschweig  
Beethovenstraße 52  
D-3300 Braunschweig

Untersuchung im Auftrag des Niedersächsischen Ministers für Wissenschaft  
und Kunst (Az.: 21.2-41.6(14/80) - Erlaß Nr.: 2091 - B V 4e - 14/80)

"Gefördert mit Hilfe von Forschungsmitteln des Landes Niedersachsen"

Postsendungen:  
Beethovenstraße 52, 3300 Braunschweig  
Erfüllungsort und Gerichtsstand: Braunschweig

Fernsprecher: (05 31) 391 5431

Fernschreiber: 9 52 698 ibstb d  
Telegrammadresse: MPA Braunschweig

Zur Vermeidung von Verzögerungen wird dringend gebeten, Zuschriften nur an das Institut zu richten, nicht aber an einzelne Mitarbeiter.

## Inhalt

## Seite

1	Einleitung	2
2	Verhalten von Beton unter Temperatureinwirkung	3
3	Thermoanalytische Betonuntersuchungen	4
4	Bestimmung der Reaktionswärmen	8
5	Experimentelle Untersuchungen	11
5.1	Versuche mit zylindrischen Probekörpern	11
5.1.1	Versuchsprogramm	11
5.1.2	Versuchstechnik	12
5.1.3	Vorversuche	14
5.1.4	Versuchsdurchführung	15
5.1.5	Ergebnisse	17
5.1.6	Zusammenfassung: Zylindrische Probekörper	24
5.2	Versuche mit plattenförmigen Probekörpern	25
5.2.1	Versuchsprogramm	25
5.2.2	Versuchstechnik	26
5.2.3	Vorversuche	28
5.2.4	Versuchsdurchführung	29
5.2.5	Temperaturentwicklung in den Probekörpern	31
5.2.6	Untersuchung der erkalteten Probekörper	34
5.2.7	Zusammenfassung: Plattenförmige Probekörper	39
5.3	Laboruntersuchungen	40
6	Zusammenfassung	44

Literatur

Tabellen

Bilder

## 1. Einleitung

Das Verhalten von Beton unter extremen thermischen Einwirkungen wurde bisher hauptsächlich für den Brandfall untersucht; materialwissenschaftliche Arbeiten über die Hochtemperaturfestigkeit von Beton finden sich zum Beispiel in [1]. Im Zuge eines weiteren Ausbaus und der Weiterentwicklung von Kernkraftwerken und den dazugehörigen Entsorgungs- und Wiederaufbereitungsanlagen ist es aber dringend notwendig, Erkenntnisse und Erfahrungen zu sammeln über das Verhalten von Beton unter Einwirkungen von weitergehenden Katastrophenbeanspruchungen, wie sie z. B. als Folge eines Kernschmelzens in Kernkraftwerken und ähnlichen Anlagen auftreten können.

Die dabei auftretenden Temperaturen von bis zu 3000 °C greifen in Form von Metallschmelzen direkt den Beton an, der somit sehr hohen Wärmestromdichten ausgesetzt ist. Es stellt sich die Frage, wie Beton unter solchen Einwirkungen reagiert, welche kritischen Materialsituationen (z. B. explosionsartige Zerstörung des Materials) auftreten, und ob dabei die Metallschmelzen dickwandige Strukturen zerstören oder gar durchdringen können. Mit den aus ausgewählten Versuchen gewonnenen Daten über die Zerstörung bzw. Schutzwirkung des Werkstoffes Beton beim Angriff flüssiger Metalle werden sich aller Wahrscheinlichkeit nach neue Aspekte bezüglich der Sicherheitsbetrachtungen an Containments von Kernkraftreaktoren ergeben, die unmittelbar in die technologische Lösung zum Bau eines möglichst wirtschaftlichen Core-Catchers einfließen.

Die bis jetzt über diese Thematik vorliegenden Erkenntnisse müssen als ausgesprochen gering bezeichnet werden. Ein erster zusammenfassender Bericht über entsprechende Untersuchungen in den USA und Großbritannien ist in [2] veröffentlicht. Aus der Bundesrepublik Deutschland liegen Erfahrungen vor, die im Kernforschungszentrum Karlsruhe und bei der KWU Erlangen über das Verhalten von Beton unter Einwirkung von Plasmastrahlen (lokaler Thermoschock) gemacht wurden [3].

Als Grundlage und zum Verständnis der Ergebnisse der Versuche über diese Problematik dient eine Vorstudie, in der die Ergebnisse über das physikalische Verhalten von Beton bei Temperaturbelastung nach eigenen Erkenntnissen und nach Angaben aus der Literatur zusammengestellt sind. Gleichzeitig werden einige der auch bei diesem Forschungsvorhaben angewandten thermoanalytischen Untersuchungsmethoden vorgestellt.

## 2. Verhalten von Beton unter Temperatureinwirkung

Das thermische Verhalten von Beton wurde im Zuge der Entwicklung von Spannbeton-Druckbehältern für Kernkraftwerke und im Rahmen der Erforschung des Brandverhaltens von Stahlbetonbauteilen vielfach studiert. Über die mechanischen Eigenschaften von Beton liegen beispielsweise umfangreiche Untersuchungsergebnisse im Temperaturbereich von 20 bis 200°C vor, die im Zusammenhang mit der Reaktorforschung erarbeitet wurden. Der Temperaturbereich von 20 bis 1000°C wurde diesbezüglich vor allem unter dem Gesichtspunkt der Brandbeanspruchung von Stahlbetonkonstruktionen betrachtet.

Soweit es die physikalischen Eigenschaften des Betons betrifft, sind die vorliegenden Untersuchungsergebnisse weniger ausführlich und vor allem über eine Vielzahl der verschiedenartigsten Fachzeitschriften verstreut, so daß es schwierig ist, sich rasch einen Überblick über den derzeitigen Kenntnisstand zu verschaffen. Der Temperaturbereich der durchgeführten Untersuchungen ist ebenfalls fast ausschließlich auf 20 bis 1000°C beschränkt, so daß für darüber hinausgehende Fragestellungen nur sehr wenig Erfahrungen vorliegen.

In dem vorliegenden Abschnitt wird versucht, den Kenntnisstand über das Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen zusammenfassend darzustellen. Betrachtet wird der Temperaturbereich von 20 °C bis zum Schmelzen des Betons ( $\sim 1350$  °C). Der Schmelzvorgang von Beton wurde mit in die Betrachtung einbezogen, weil die fortgeschrittenen Sicherheitsbetrachtungen für bestimmte Reaktorkonfigurationen entsprechende Untersuchungen unumgänglich machen [4, 5]. Naturgemäß ist unser Kenntnisstand über Materialeigenschaften oberhalb 1000 °C besonders gering.

Im ersten Teil des Abschnitts wird die thermische Stabilität von Beton betrachtet. Behandelt werden Kristallumwandlungen, Rekristallisationsvorgänge und Abbaureaktionen infolge der Wasser- und CO<sub>2</sub>-Freisetzung im Beton. Die bei den einzelnen Vorgängen auftretenden Wärmetönungen wurden so weit wie möglich quantitativ bestimmt und diskutiert

### 3. Thermoanalytische Betonuntersuchungen

Bei einer thermischen Beanspruchung von hochofen- oder portlandzementgebundenen Betonen tritt bereits bei mäßigen Temperaturerhöhungen eine ganze Reihe von Umwandlungen und Reaktionen der verschiedensten Art auf. Es handelt sich dabei, abgesehen von den vornehmlich in Zuschlägen auftretenden Kristallumwandlungen, hauptsächlich um sogenannte Abbaureaktionen, weil diese Reaktionen einen sukzessiven Abbau der Betonstruktur bewirken. Die Abbaureaktionen laufen vorzugsweise im Zementstein, entsprechend der vorliegenden Gesteinsart aber auch im Betonzuschlag ab, wobei bei niedrigen Temperaturen Entwässerungs- und Dehydratationsreaktionen im Vordergrund stehen. Bei höheren Temperaturen tritt in karbonatischen Zuschlägen die Entsäuerung des Kalksteins in den Vordergrund [6]. Oberhalb von 1200 bis 1300°C beginnen einige Komponenten des Betons zu schmelzen. Während des Schmelzens zeigen verschiedene Betonzuschläge, z. B. Ergußgesteine wie Basalt, Entgasungs- und Bläherscheinungen, bei denen die während der Gesteinsbildung eingeschlossenen Gase freiwerden. Oberhalb von 1300 bis 1400°C liegt der Beton als Schmelze vor.

Die während der Erwärmung des Betons einsetzenden Reaktionen lassen sich meßtechnisch mit Hilfe der Differential-Thermoanalyse (DTA) nachweisen. Bei diesem Meßverfahren werden eine Inertprobe (meist  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) und die zu untersuchende Probe gleichzeitig in einem Ofen erhitzt und die durch Umwandlungsreaktionen zwischen den beiden Proben auftretenden Temperaturunterschiede registriert. Bild 1 zeigt solche Thermogramme für portlandzementgebundene Normalbetone mit quarzitisches, kalzitischen und basaltischen Zuschlägen. Die Thermogramme wurden im Hinblick auf die im folgenden Abschnitt diskutierten Reaktionswärmen erstellt, wobei pulverisierte Proben und übliche Einwaagemengen (ca. 100 mg) zur Anwendung kamen. Die DTA-Analysen zeigen deutlich die folgenden mit einer Wärmetönung verbundenen Reaktionsabläufe:

- Entwässerung bei etwa 100°C
- Gelabbau (Dehydratation 1. Stufe) bei 180°C
- Portlanditzersetzung bei 500°C
- Quarzumwandlung bei 570°C
- Zersetzung der CSH-Phasen ab 700°C
- Kalksteinentsäuerung ab 800°C
- Beginn des Schmelzens ab 1150 - 1200°C.

Quantitativ lassen sich vor allem solche Reaktionen verfolgen, die mit einem Massenumsatz, der sich in einer deutlichen Gewichtsänderung äußert, verbunden sind. Entsprechende Untersuchungen wurden mit Hilfe einer Groß-Thermowaage für Beton durchgeführt. Das Bild 2 zeigt die Meßergebnisse von solchen thermogravimetrischen Untersuchungen. Dargestellt ist auf der Y-Achse der Gewichtsverlust (bezogen auf die Einwaage) von drei portlandzementgebundenen Betonen mit quarzitischen, basaltischen bzw. kalzitischen Zuschlägen über der Temperatur. Als Proben dienten kleine Betonzylinder ( $\varnothing$  12 mm, l = 40 mm), die durch Ausbohren aus dicken Betonscheiben gewonnen wurden. Die Bohrkerne wurden ebenso wie zuvor die Betonscheiben bei 20°C und 65 % rel. Feuchte bis unmittelbar vor Versuchsbeginn im Klimaraum gelagert.

Bild 2 zeigt deutlich, daß schon bei Temperaturen unterhalb von 100°C ein Gewichtsverlust im Beton auftritt, der dem Verdunsten von Wasser aus den Grobporen zuzuordnen ist. Knapp oberhalb von 100°C setzt dann verstärkt ein Gewichtsverlust durch Verdampfen des Grobporenwassers ein. Die Steigungen der Kurven verlaufen bis ca. 200°C nahezu konstant und sind nahezu unabhängig vom Druck in der Thermowaage (35 mbar, Atmosphärendruck). Ein diskreter Siedepunkt ist anhand des Thermogrammes nicht auszumachen. Das resultiert einmal daraus, daß bei der gewählten Aufheizgeschwindigkeit von 5 K/min ein Temperaturgradient in Richtung Probekörperachse den Siedepunkt verschmiert und daß zum anderen für jedes Volumenelement konstanter Temperatur aufgrund der unterschiedlichen Porengrößen ein ganzes Spektrum von Siedepunkten (je nach Porenradius entsprechend

den Kapillarkräften) existiert. Des weiteren sind Stoff- und Wärmetransport gekoppelte Phänomene, so daß auch aufgrund der endlichen Wärmeleitfähigkeit des Betons im Versuch kein ausgeprägter Siedepunkt auftreten kann.

Oberhalb von 220°C verlaufen die Kurven dann etwas flacher. Bei diesen Temperaturen wird vor allem das Wasser aus den feineren Poren freigesetzt. Des weiteren wird auch schon chemisorbiertes Wasser desorbiert (Gelabbau, Dehydratation 1. Stufe).

Die freigesetzten Wassermengen betragen bis 500°C etwa 2 bis 4 Gew.-% ( $\approx 50 \rightarrow 100$  l Wasser/m<sup>3</sup> Beton). Bei der Bewertung dieser Angabe ist zu beachten, daß die geprüften Betonproben bei 20°C und 65 % rel. Feuchte gelagert wurden. Das Betonalter betrug jeweils mehr als 100 Tage. Selbstverständlich sind auch die Zementart und der Wasser/Zement-Wert bei solchen Untersuchungen zu berücksichtigen, worauf hier jedoch nicht weiter eingegangen werden kann.

Im Temperaturbereich von 500°C bis ca. 700°C nimmt der Gewichtsverlust noch einmal kräftig zu. Ursache dafür ist neben der Portlanditzerersetzung ( $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ ) bei 450°C - 550°C, die Zersetzung der CSH-Phasen mit anschließender Bildung von  $\beta\text{-C}_2\text{S}$ . Beide Reaktionen sind mit einer Wasserabgabe verbunden. Sie liegt in der Größenordnung von 3 Gew.-% ( $\approx$  ca. 75 l Wasser/m<sup>3</sup> Beton). Neben den bisher diskutierten Phänomenen tritt bei einigen Betonzuschlägen (z. B. bei Serpentin) die Abgabe von zeolitisch gebundenem bzw. chemisorbiertem Wasser auf, die zugehörigen Entwässerungsreaktionen laufen je nach Bindungsstärke im Temperaturbereich von 120 - 600°C ab.

Betone mit Kalksteinzuschlägen zeigen bei Temperaturen oberhalb von 600°C einen zusätzlichen Gewichtsverlust. Ursache dafür ist die Kalksteinent säuerung ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ), bei der 44 Gew.-% des  $\text{CaCO}_3$  als  $\text{CO}_2$  abgegeben werden können. Der gesamte Gewichtsverlust des hier untersuchten Kalksteinbetons beträgt entsprechend Bild 2 34 Gew.-%, davon sind etwa 5 bis 6 % auf die Wasserrfreisetzung zurückzuführen.

Im Temperaturbereich von 900 °C bis zum Einsetzen des Schmelzens bei ca. 1150 - 1200 °C ist bei den untersuchten Proben kein meßbarer Gewichtsverlust mehr aufgetreten. Bei einigen Schmelzen ist jedoch ein Aufblähen der Betonzuschläge (z. B. Basalt), beobachtet worden. Die Bläherscheinungen wurden offenbar durch entweichende Gase hervorgerufen. Diese Beobachtungen wurden an in der Thermowaage auf 1270 °C erhitzten Betonprobekörpern gemacht. Die Proben befanden sich während des Erhitzens in Keramiktiegeln, die nach dem Abkühlen zur Inspektion der Betonrückstände zersägt werden mußten, da sich die Betonschmelze fest mit der Keramik verbunden hatte und ein Herauslösen der Rückstände nicht möglich war. Es war zu erkennen, daß der Basaltbeton bei dieser Temperatur zum größten Teil bereits erschmolzen war, während der quarzitische Beton noch deutlich geformte Zuschlagkörner aufwies. Dagegen zeigte der Kalksteinbeton nur örtlich aufgeschmolzene, glasartige Bestandteile. Den größten Anteil der Restmasse bildete das weiße poröse CaO.

Im aufgeschmolzenen quarzitischen Beton waren weiße kristalline Bereiche (Kristalle mit kubischem Habitus) zu erkennen. Offenbar handelt es sich um Quarzkörner der kubischen SiO<sub>2</sub>-Modifikation  $\alpha$ -Christobalit. Die gleichen Kristalle wurden auch beim Basaltbeton, der ebenfalls als Feinzuschlag quarzitischen Sand enthielt, gefunden. Ferner ließ sich sowohl beim Basalt- als auch beim Quarzitbeton ein feines System von Bläschen erkennen, als deren Bildungsursache die Entweichung von Restgasen schon genannt wurde. Eine weitere wichtige Beobachtung ist, daß unabhängig vom Zuschlag bei allen drei Betonen die Zementsteinmatrix in jedem Fall in eine glasartige Phase übergeht.



#### 4. Bestimmung der Reaktionswärmen

Im Hinblick auf eine rechnerische Vorhersage des thermischen Verhaltens von massigen Bauteilen interessieren natürlich nicht nur die umgesetzten Massen, sondern auch die bei den einzelnen Reaktionen umgesetzten Wärmemengen. In den Tabellen 2 und 3 sind die im Beton ablaufenden Reaktionen mit den dazugehörigen Temperaturbereichen, den Reaktions- bzw. Umwandlungswärmen und den umgesetzten Massen nach unseren Erfahrungen zusammengestellt. Es wurde jeweils ein kalzitischer und ein quarzitischer Massenbeton mit Hochofenzement betrachtet. Der Mischungsaufbau des kalzitischen Reaktorbetons ist auf Tabelle 1 angegeben. Bei der Berechnung der Umwandlungswärmen und der umgesetzten Mengen für einen quarzitischen Beton wurde von einem Beton mit einem dem Kalksteinbeton analogen Mischungsaufbau ausgegangen. Es wurde weiter vorausgesetzt, daß es sich bei beiden Betonen um Massenbetone mit nahezu 100 %-iger Wassersättigung handelt.

Im Bereich der Verdunstung bzw. Verdampfung von physikalisch gebundenem Wasser ist beim Massenbeton mit einer erheblichen Wasserfreisetzung zu rechnen. Es verdunsten zunächst aus den größeren Poren im oberflächennahen Bereich größere Mengen Wasser. Ab 100°C setzt dann verstärkt die Verdampfung des Wassers ein. Das Wasser wird dabei durch erhöhte Dampfdrücke ( $> 760$  Torr) auch aus oberflächenferneren Bereichen vergleichsweise rasch ausgetrieben (Dampfströmung). Die Ausdampftrate kann bei rascher Aufheizung beträchtliche Werte annehmen. So wurden an einem Massenbetonprobekörper (Gewicht ca. 11 Mg) Ausdampfraten von  $2,5 \text{ l/m}^2 \text{ h}$  gemessen (Temperaturanstiegsgeschwindigkeit ca.  $40^\circ\text{C/h}$  auf der heißen Betonoberfläche) [7].

Ab  $120^\circ\text{C}$  beginnt die Abgabe von in den kleineren Poren physikalisch gebundenem bzw. chemisorbiertem Wasser. Im Bereich von  $600^\circ\text{C}$  ist dieser Vorgang nahezu abgeschlossen. Aus eigenen Messungen ist bekannt, daß bis  $120^\circ\text{C}$  aus wassersattem Beton ca.  $130 \text{ kg Wasser/m}^3$  ausgetrieben werden können. Im Bereich  $120$  bis  $600^\circ\text{C}$  sind dann noch einmal  $50 - 60 \text{ kg Wasser/m}^3$  Beton

zu erwarten. Als Umwandlungswärme wurde näherungsweise die Verdampfungswärme von Wasser angenommen (was streng genommen nur für den Temperaturbereich unterhalb  $120^{\circ}\text{C}$  gilt, da z. B. für chemisorbiertes Wasser noch die Bindungsenergie zur Desorption zugeführt werden muß). Pro  $\text{m}^3$  Beton ergeben sich damit Reaktionswärmen von ca. 290 MJ für die Entwässerung bis  $120^{\circ}\text{C}$  und ca. 135 MJ für die Entwässerung im Bereich  $120^{\circ}\text{C} - 600^{\circ}\text{C}$ .

Im Temperaturbereich von  $30^{\circ}\text{C}$  bis  $300^{\circ}\text{C}$  findet parallel zur Entwässerung ein Abbau des Zementsteins statt (Dehydratation 1. Stufe). Das Maximum der Abbaurate liegt bei ca.  $180^{\circ}\text{C}$ . Bei der Berechnung der Umwandlungswärmen wurde davon ausgegangen, daß ca. 20 % (näherungsweise der Anteil von  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  im Zementstein) an diesen Abbaureaktionen beteiligt sind. Als Reaktionswärme wurde die Hydratationswärme von  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  (ca. 250 kJ/kg) angenommen [8]. Für diese 1. Stufe des Gelabbaus müssen dem Beton somit ca.  $20 \text{ MJ/m}^3$  zugeführt werden.

Im Temperaturbereich von  $450 - 550^{\circ}\text{C}$  tritt bei portlandzementgebundenen Betonen die Zersetzung des Portlandits auf ( $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ , Reaktionswärme ca. 1000 kJ/kg). Die Menge des sich bei der Hydratation des Betons bildenden Portlandits beträgt für einen Beton mittleren Zementgehalts etwa 40 kg. Bei Hochofenzementen (= 64 ÷ 15 % Portlandzementklinker + 36 ÷ 85 % Hüttensand, werkmäßig zusammen vermahlen) bildet sich nur aus den Klinkerphasen des Portlandzements  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , d. h., daß der Gehalt an  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - bezogen auf die bei der Zersetzung anfallende Menge  $\text{CaO}$  - deutlich unter  $40 \text{ kg/m}^3$  liegt. Die zugehörige Reaktionswärme von  $40 \text{ MJ/m}^3$  gibt also nur einen oberen Grenzwert an.

Bei  $570^{\circ}\text{C}$  tritt die  $\alpha$ - $\beta$ -Quarzinversion auf. Diese Kristallumwandlung ist reversibel und endotherm. Sie ist mit einer Umwandlungswärme von 5,9 kJ/kg  $\text{SiO}_2$  verknüpft. Unter der Annahme, daß ca. 75 % der zugesetzten quarzitischen Zuschläge an der Umwandlung beteiligt sind, ergeben sich Umwandlungswärmen von  $8,8 \text{ MJ/m}^3$  für den quarzitischen und ca.  $1,2 \text{ MJ/m}^3$  für den kalzitischen Beton.

Eine weitere Zersetzung des Zementsteins tritt zwischen 600 - 700°C auf (Zersetzung der CSH-Phasen und Bildung von  $\beta$ -C<sub>2</sub>S). Da Hochofenzement durchschnittlich 60 % C<sub>3</sub>S enthält und die Hydratationswärme ca. 500 kJ/kg beträgt, ist mit einer Umsetzungswärme von ca. 120 MJ/m<sup>3</sup> Beton zu rechnen.

Um 780°C ist mit der Rekristallisation des unhydratisierten Hüttensandes zu rechnen. Selbst wenn man annimmt, daß der außerordentlich hohe Anteil von 100 kg Hüttensand nicht hydratisiert war, ergibt sich nur eine exotherme Reaktionswärme von 5 MJ/m<sup>3</sup>.

Im Temperaturbereich zwischen 600 und 900°C beginnt die Entsäuerung des Kalksteins ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ). Die Dissoziationswärme ist temperatur- und druckabhängig und beträgt bei 900°C und 1 bar ca. 1637 kJ/kg Kalkstein [9]. Die Zersetzungsgeschwindigkeit und die Zersetzungstemperatur sind nicht nur stark temperatur- und druckabhängig, sondern sie werden auch vom Gehalt an SiO<sub>2</sub>, das immer im Kalkstein vorhanden ist, beeinflusst. Bei einem Partialdruck des CO<sub>2</sub> von 760 Torr kann die Zersetzungstemperatur den Bereich von 850°C (reiner Kalkstein) bis 560°C ( $\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$ ) überstreichen [9]. Für calcitischen Beton ist insgesamt etwa mit einer Dissoziationswärme von 2360 MJ/m<sup>3</sup> zu rechnen. Dabei wird vorausgesetzt, daß der Kalkstein zu ca. 90 % aus CaCO<sub>3</sub> besteht. Es entstehen dabei ca. 630 kg CO<sub>2</sub>, die bei 900°C und 760 Torr ein Volumen von 1400 m<sup>3</sup> einnehmen!

## 5 Experimentelle Untersuchungen

Gemäß dem im Antrag formulierten Arbeitsprogramm wurden im Anschluß an die Literaturstudie die experimentellen Untersuchungen mit den Aufgabenstellungen - Versuche mit zylindrischen und Versuche mit plattenförmigen Betonkörpern - durchgeführt.

### 5.1 Versuche mit zylindrischen Probekörpern

#### 5.1.1 Versuchsprogramm

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Versuche waren so konzipiert, daß die Möglichkeit bestand, den Kontakt zwischen Beton und flüssigem Stahl zu steuern, und die dabei auftretenden Reaktionen zu studieren.

Der prinzipielle Versuchsaufbau mit einem Überblick über das gesamte Versuchs- und Meßprogramm ist auf Bild 3 angegeben.

Das Versuchsprogramm gliederte sich in 2 Teile:

- a) Temperaturbelastung der Betonproben durch Annäherung an die Schmelze,
- b) Eintauchen der Probekörper in die Schmelze.

Zu a)

Der Probekörper wurde über der Mitte des Ofens positioniert und bis dicht über die Oberfläche der Schmelze abgesenkt. Die Positionierung und Absenkung wurde mit der auf Bild 4 dargestellten Absenkvorrichtung vorgenommen. Die Betonprobe wurde dann langsam weiter abgesenkt, wobei sich die Absenkgeschwindigkeit nach dem Grad der Zerstörung der Probe richtete (Zerstörung durch Abschmelzen und Abplatzen des Betons). Die Zerstörung der Probe wurde festgestellt durch:

- visuelle Beobachtung (durch Videokamera aufgezeichnet),
- Anzeige der Kraftmessdose (Gewichtsverlust),
- Anzeige bzw. Ausfall der einbetonierten Thermoelemente.

Zu b)

Mit derselben Absenkvorrichtung wie im Versuchsteil a) wurden die Probekörper definiert tief und definiert lange in die Schmelze eingetaucht. Das Messprogramm blieb im wesentlichen das gleiche. Neben der Aufmerksamkeit, die auf die Zerstörung des Betons durch Abschmelzen und Abplatzen gerichtet war, war auch das Verhalten der Schmelze von besonderem Interesse. Die Änderung des Verhaltens der Schmelze beim Zusammenkommen mit Beton ist für die Beurteilung des Gesamtsystems Beton-Schmelze äußerst wichtig. Deshalb wurden im Anschluß an die Versuche die entstandenen Schlacken einer chemischen Analyse unterworfen, die Auskunft geben sollte über Umsetzungen, die zwischen Beton und Schmelze stattgefunden haben.

#### 5.1.2 Versuchstechnik

Die Probekörper hatten die Form eines Zylinders mit einem Durchmesser von 80 mm und einer Länge von 300 mm. Es wurden Betonproben untersucht, die sich

- a) durch ihre betontechnologische Zusammensetzung und
- b) durch verschiedene Lagerungsbedingungen unterschieden.

Für die Versuche wurden zwei mineralogisch unterschiedliche Betontypen ausgesucht: ein Normalbeton mit quarzitischem Zuschlag, wie er in Norddeutschland häufig Verwendung findet, und ein Normalbeton mit kalzitischem Zuschlag, wie er viel in Süddeutschland und in den USA verwendet wird. Durch diese beiden Betone wird nicht nur eine geografische Verbreitung repräsentiert, sondern sie sind auch durch ihr unterschiedliches Verhalten bei Temperaturbelastung, vor allem im Hochtemperaturbereich, von Interesse. Die betontechnologischen Daten der beiden Betone sind auf Tabelle 4 angegeben.

Die Lagerungsbedingungen der einzelnen Probekörper bis zu den Versuchen unterschieden sich in Temperatur und Umgebungsfeuchtigkeit: neben der Lagerung nach DIN bei 20 Grad Celsius und 65 %rel. Luftfeuchtigkeit wurde eine Lagerung bei 105 Grad Celsius zur Trocknung durchgeführt.

In die Probekörper wurden jeweils 7 Thermoelemente (NiCr-Ni, Messbereich bis zu 1370 Grad Celsius) einbetoniert. Die Anordnung

der Thermoelemente ist auf Bild 5 dargestellt. Die Hälfte der Probekörper war mit einem als Splitterschutz wirkenden Bewehrungsgitter versehen, das etwaige explosionsartige Abplatzungen verhindern sollte.

Der apparative Versuchsaufbau - Absenkvorrichtung mit Messaufnehmern - ist auf Bild 4 dargestellt. Nicht dargestellt sind die Mess- und Regelanlagen für den Schmelzofen, sowie die für die betonseitig gemessenen Werte notwendigen Mess- und Registrier-einrichtungen, die im folgenden beschrieben werden.

Der flüssige Stahl (St 52) wurde in einem kernlosen Induktionsofen (Leistung 50 kW) erschmolzen. Es wurden 40 kg Stahl bis zu einer Temperatur von max. 1750 Grad Celsius erhitzt. Zur Beruhigung der Stahlschmelze wurden geringe Mengen Aluminium und Silizium zugegeben. Die Temperaturbestimmung erfolgte mit PtRh-Pt-Thermoelement-Tauchsonden (Messbereich bis zu 1750 Grad Celsius). Die Auskleidung des Ofens war basisch ( $MgO$ ). Die Stahlschmelze rotierte auf Grund der durch die Induktion übertragenden Kräfte. Die Oberfläche der Schmelze war vor Versuchsbeginn schlackenfrei. Die sich bei den Versuchen auf der Schmelze ansammelnde Schlacke wurde jeweils nach Versuchsende geborgen und später chemisch analysiert.

Die zylindrischen Betonprobekörper waren, wie auf Bild 5 dargestellt, mit NiCr-Ni-Thermoelementen bestückt. Damit war es möglich, den Temperaturverlauf im Probekörper zu erfassen, und auf Grund des Ausfalls der einzelnen Thermoelemente den Fortschritt des Abschmelzens zu bestimmen. Absenkweg und Eintauchtiefe wurden mit einem induktiven Wegaufnehmer gemessen. Die Gewichtsänderung der Probekörper wurde durch eine Kraftmessdose festgestellt. Die anfallenden Messwerte wurden zur ständigen Beobachtung auf Linienschreibern und in Form von Ausdrucken aufgezeichnet. Es wurden die Zeiten gemessen, die die Probekörper bei den Annäherungsversuchen der Temperaturbelastung ausgesetzt waren, und zusätzlich die Zeitdauer, die die Probekörper in die Stahlschmelze eingetaucht waren. Das gesamte Versuchsgeschehen wurde mit einer Videoanlage mit eingespielter Uhr aufgezeichnet. Besonders auffallende Ereignisse, z.B. die Probekörper kurz nach der Temperaturbelastung und in wieder erkalteten Zustand wurden fotografisch

#### 5.1.4 Durchführung der Versuche

Die Versuche wurden entsprechend dem vorne dargestellten Programm durchgeführt; eine Übersicht wird auf Tabelle 5 gegeben.

a) Temperaturbelastung der Probekörper durch Annähern an die Stahlschmelze:

Die Probekörper wurden über der Ofenmitte positioniert und zügig bis direkt über die Schmelze (wenige Millimeter Abstand) abgesenkt. Die einbetonierten Thermoelemente zeigten einen schnellen Anstieg der Temperatur im Probekörper an. Nach 2-3 Minuten begann der Beton zu schmelzen. Der geschmolzene Beton verteilte sich auf die Metallschmelzenoberfläche und bildete eine Schlackenschicht. Dabei waren keine heftigen Reaktionen festzustellen.

Im Schlackenaufkommen gab es einen erheblichen Unterschied zwischen dem quarzitischen und dem kalzitischen Beton. Die Menge der Schlacke war beim quarzitischen Beton etwa 2-3 mal so gross wie beim kalzitischen Beton. Ein weiterer Unterschied war in der Konsistenz der Schlacke festzustellen. Die Schlacke des quarzitischen Betons war zähflüssig. Dies führte in Verbindung mit der großen Menge der anfallenden Schlacke bald zu einem Festbacken des Probekörpers mit der Schlacke und mit der Ausstellung des Ofens. Die Schlacke des kalzitischen Betons war dagegen dünnflüssig. Da sie ausserdem nur in geringen Mengen auftrat, verteilte sie sich an den Rand des Ofens und ließ einen grossen Teil der Metallschmelzenoberfläche frei.

Ein Unterschied im Verhalten zwischen vorgetrockneten und normal gelagerten Betonproben konnte nicht festgestellt werden.

Abplatzungen von Betonstücken traten in keinem Fall auf. Es wurde auch kein in flüssiger Form austretendes Betonwasser festgestellt.

Auf Grund dieser statischen Annäherungsversuche konnte die Abschmelzrate des Betons abgeschätzt werden. Die nächsten Versuche wurden nun so durchgeführt, daß die Probekörper mit der für den jeweiligen Beton abgeschätzten Abschmelzgeschwindigkeit weiter abgesenkt wurden. Bei diesen Nachfahrversuchen ergaben sich natürlich höhere Abschmelzgeschwindigkeiten, da der Abstand Beton-Metallschmelze immer gleich blieb.

b) Eintauchen der Probekörper in die Stahlschmelze:

Bei diesem Teil des Versuchsprogramms wurden die Betonproben definiert tief und definiert lange in die Metallschmelze eingetaucht. Diese Versuche wurden ebenfalls mit der beschriebenen Absenkvorrichtung durchgeführt. Dazu wurden die Probekörper über der Mitte des Ofens positioniert, und der Abstand Probenunterkante-Schmelzenoberfläche ausgemessen. Dann wurde der Probekörper bis zur vorgesehenen Eintauchtiefe abgelassen. Der Weg wurde mit dem induktiven Wegmesssystem verfolgt. Das Aufschwimmen des Betons ( $\rho(\text{bet}) = 2,3 \text{ kg/dm}^3$ ,  $\rho(\text{fe}) = 7,8 \text{ kg/dm}^3$ ) wurde durch eine mässige Eintauchtiefe und durch Beschweren der mit dem Probekörper starr verbundenen Schutzabdeckung verhindert. Die Eintauchtiefe und die Eintauchzeit wurden aus 2 Gründen variiert:

- als Vorsichtsmassnahme: es lagen keine Erfahrungen über die Heftigkeit der Reaktionen beim Zusammenkommen von Beton und flüssigem Metall vor,
- der Klarheit der Auswertung wegen: nur durch das verschieden tiefe und verschieden lange Eintauchen konnten die Phänomene getrennt werden, die sich aus verschiedenen großen benetzten Oberflächen und aus verschiedenen langen Reaktionszeiten ergaben.

Die eingetauchten Probekörper wurden nach den vorgesehenen Zeiten aus der Schmelze herausgezogen. Im Fall der quarzitischen Betonproben gab es bei langen Eintauchzeiten Schwierigkeiten durch die grossen Schlackenmengen und das dadurch verursachte Festbacken der angeschmolzenen Probekörper am Ofen. In 2 Fällen musste die Ausstellung des Ofens beschädigt werden, um die Reste der Probekörper zu entfernen. Die geprüften Probekörper wurden fotografiert und nach dem Abkühlen luftdicht verpackt, um später weiter untersucht werden zu können.



### 5.1.5 Ergebnisse

#### Reaktionen beim Annähern

Beim vorsichtigen Annähern der Betonprobekörper bis direkt über die Stahlschmelze war als erste Reaktion das Ansteigen der Temperatur im Probekörper zu beobachten.

Optisch ließ sich diese Erwärmung der Probekörper erkennen durch eine kleine Rauchfahne, die durch das Heraustreiben von freiem und einem Teil des physikalisch gebundenen Wassers hervorgerufen wurde. Das Austreten von Wasser in flüssiger Form wurde nicht beobachtet. Das weitere Austrocknen ließ sich verfolgen durch das Auftreten feiner Risse in den erwärmten Bereichen und das Durchlaufen einer Verfärbungsfront längs durch den Probekörper.

Danach begann der Beton zu schmelzen, und die Betonschmelze tropfte und floß auf den flüssigen Stahl.

Meßtechnisch erfaßt wurden die Temperaturerhöhungen durch die einbetonierten Thermoelemente. Die Bilder 6-9 zeigen in verschiedenen Probekörpern die Temperaturverteilungen, wie sie sich auf Grund der Temperaturbelastungen durch Annähern und Nachfahren ergaben.

Bild 6 zeigt, wie die Temperaturfront durch den Probekörper wandert. Die Temperaturerhöhung ist naturgemäß an der temperaturbelasteten Seite am größten. Das weit entfernte 7. Thermoelement zeigt auch nach 15 min noch keine Temperaturerhöhung an.

Die Bilder 7-9 zeigen explizit, wie sich die Temperaturen mit der Dauer der Reaktionszeit erhöhten.

Bild 7 zeigt für kalzitischen Beton den Temperaturverlauf, wie er für die ersten 4 Thermoelemente jeweils in einem Norm-gelagerten und in einem vorgetrocknetem Probekörper angezeigt wurde. In der Anzeige bei 100 Grad Celsius läßt sich deutlich der Unterschied zwischen Norm-gelagertem und vorgetrocknetem Beton erkennen. Bei dem Norm-gelagerten, also feuchteren Beton, ergibt sich eine Verzögerung im Temperaturanstieg, die durch das Verdampfen des freien Wassers verursacht wird. Dadurch ergibt sich für eine kurze Zeit eine niedrigere Temperatur als im vorgetrocknetem Beton. Später ~~allerdings ist die Temperatur im nicht vorgetrocknetem Beton höher~~

als im vorgetrockneten Beton.

Dieses Verhalten läßt darauf schließen, daß bei verschiedenen Temperaturen verschiedene Mechanismen der Wärme- und Temperaturleitung wirksam werden, die sich wie folgt darstellen lassen:

verursacht durch den kombinierten Wärme- und Stofftransport bei der Erwärmung von Beton steigt die Temperatur bis zu 100 Grad Celsius im feuchteren Beton schneller an. Die Wärmeleitung wird dabei durch den Wasserdampftransport erhöht. Im trockenen Beton dagegen wird die Wärmeleitung durch Risse behindert. Bei 100 Grad Celsius ergibt sich die erwähnte Verzögerung im Temperaturanstieg durch die Verdampfung des freien Wassers. Dieser Effekt wird natürlich im feuchteren Beton erheblich wirksamer.

Die Tatsache, daß der Norm-gelagerte Beton zu späterer Zeit einen schnelleren Temperaturanstieg zeigt, kann durch die vermutlich andere Porenverteilung erklärt werden.

Die Bilder 8 und 9 zeigen für quarzitisches Beton ein ähnliches Verhalten. Auf diesen beiden Bildern sind die Temperaturanzeigen aller 7 Thermoelemente aufgetragen.

#### Reaktionen beim Eintauchen:

Bei den Eintauchversuchen wurde der Beton durch die oben geschilderte Vorgehensweise so wenig wie möglich vor der eigentlichen Reaktion erwärmt. Dadurch wurde ein echtes Thermoschockverhalten geprüft. Bei einer Temperaturdifferenz von etwa 1600 Kelvin, überwunden in ca. 1 s, führte dies zu einer Belastungsgeschwindigkeit von 1600 Kelvin/s.

Wegen der großen Belastungsgeschwindigkeit war die Beobachtung einer farblichen Veränderung an den Probekörpern, wie sie beim Annähern geschildert wurde, nicht möglich. Die zu beobachtenden Reaktionen begannen mit dem Eintauchen des Probekörpers und lassen sich folgendermaßen darstellen: nach einem starken Zischen und Brodeln der Stahlschmelze wurde ein Funkenregen aus glühenden Teilchen ausgeworfen, gefolgt von einem heftigen Rütteln an der Absenkvorrichtung. Der Beton schmolz sofort und die Schmelze verbreitete sich auf der Oberfläche des flüssigen Stahls, begleitet von einem Ausstoßen von Dampf Wolken aus dem Beton.

Das Brodeln und Rütteln beruhigte sich mit der Zeit. Eine anfangs nur schwach sichtbare, kleine Flamme vergrößerte sich im Laufe der Reaktionszeit, bis nach etwa 5 min der Probekörper in Flammen gehüllt war. Besonders im Fall des Kalksteinbetons hatte es den Anschein, daß der Probekörper brannte.

Da die Probekörper nicht weiter abgesenkt wurden, verkleinerten sich die Flammen und erloschen schließlich unter mehrmaligen Aufflackern ganz. Die Reaktionen insgesamt waren damit zum Ende gekommen.

Beim Herausziehen der Probekörper tropfte geschmolzener Beton von den übriggebliebenen Stücken ab. Diese Reste glühten anfangs noch, erloschen aber schnell unter Bildung einer Schlackenschicht um die angegriffenen Teile.

Über die Temperaturentwicklung in den Probekörpern beim Eintauchen geben die Bilder 10 - 14 Auskunft. Bild 10 und 11 zeigt die Temperaturentwicklung in kalzitischem Beton in den ersten 200 s. Bei den Norm-gelagerten Betonproben fallen zwar die beiden ersten Thermoelemente früher aus als bei den vorgetrockneten Proben, insgesamt entwickeln sich jedoch die Temperaturen bis zu 100 Grad Celsius etwa gleich. Ein verzögerter Anstieg der Temperaturen in diesem Bereich beim Norm-gelagerten Beton deutet sich an.

Die Bilder 12 und 13 geben die Temperaturkurven für einen Norm-gelagerten und einen vorgetrockneten quarzitischen Beton über 20 min wieder. Es fallen insbesondere die ausgeprägten Haltepunkte bei 100 Grad Celsius beim Norm-gelagerten Beton auf. Danach steigt die Temperatur allerdings schneller als im Fall der vorge-trockneten Probekörper.

Bild 14 zeigt den Temperaturverlauf eines kalzitischen Betons über einen längeren Zeitraum an. Nach der Eintauchzeit von nur 2,5 min und dem baldigen Ausfall der ersten 3 Thermoelemente steigt die Temperatur noch etwa 25 min an und liegt im gesamten Probekörper nach 2 Stunden knapp unter 100 Grad Celsius.

Im Vergleich zu den Annäherungsversuchen steigen die Temperaturen beim Eintauchen schneller. Dies ist auf den erheblich besseren Wärmeübergang zwischen Beton und Stahlschmelze zurückzuführen. Die weiteren Wärmeleitmechanismen entsprechen im wesentlichen den

### Gasentwicklung:

Die Gasentwicklung wurde rein quantitativ beobachtet und beurteilt und schon kurz bei der Beschreibung der Reaktionen beim Annähern bzw. beim Eintauchen beschrieben.

Beim Annähern und Halten der Probekörper über der Stahlschmelze war nur eine kleine Wasserdampffahne zu beobachten.

Beim Eintauchen der Probekörper in die Stahlschmelze wurde die anfängliche Wasserdampffahne sofort von einer starken Gasentwicklung abgelöst, durch die Teilchen aus der Stahlschmelze herausgeschleudert wurden.

Akustisch äußerte sich diese erste Phase einer heftigen Gas- und Dampffreisetzung durch brodelnde und zischende Geräusche aus der Stahlschmelze, die durch die schlagartige Verdampfung des oberflächlich im Beton gebundenen Wassers entstanden. Dadurch bildeten sich Blasen in der Stahlschmelze, die beim Zerplatzen Schmelzenteilchen aus dem Ofen herausschleuderten.

Nach einigen Minuten Eintauchzeit entzündeten sich die entweichenden Gase, sodaß die Probekörper in Flammen gehüllt waren. Die Farbe der Flammen war in der Regel leichtgelb.

Die Größe der Flammen verringerte sich mit zunehmender Versuchszeit, bis mit durch das Abschmelzen bedingter abnehmender Probenlänge die Flamme schließlich erlosch.

Die Probekörper mit dem vorwiegend kalzitischen Zuschlag zeigten eine erheblich größere Gasentwicklung als die Probekörper mit dem vorwiegend quarzitischen Zuschlag. Deutlich sichtbar war dies durch die größere und länger brennende Flamme.

Ein Einfluß durch die Vorlagerung (Norm bzw. vorgetrocknet) war bzgl. der Gasentwicklung bei den kalzitischen Probekörpern nicht zu beobachten. Geringfügige Unterschiede gingen in der insgesamt heftigen Gasentwicklung unter.

Bei dem quarzitischen Beton zeigten sich bei den Norm-gelagerten Probekörpern größere Wasserdampfentwicklungen als bei den vorgetrockneten Probekörpern. Dies äußerte sich schon bei den Reaktionen beim Eintauchen, die bei den Norm-gelagerten Probekörpern heftiger waren als bei den vorgetrockneten.

Da keine qualitativen und exakten quantitativen Gasanalysen gemacht wurden, können über die Zusammensetzung der Gase nur allgemeine Angaben gemacht werden. Danach bestehen solche, bei Erwärmung aus dem Beton entweichenden Gase, hauptsächlich aus Wasserdampf, aus Wasserstoff und Sauerstoff, und im Fall des kalzitischen Betons bei höheren Temperaturen aus Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Sauerstoff. Wenn angenommen wird, daß ein großer Teil des Sauerstoffs mit dem flüssigen Stahl reagiert, bleiben für die verbrennenden Gase im wesentlichen Wasserstoff und Kohlenmonoxid übrig.

#### Ablation:

Unter Ablation sollen alle die Ereignisse verstanden werden, die zu einem Substanzverlust der Betonprobekörper führen. Das sind in diesem Fall Abplatzungen (Zuschlagstoffabplatzungen und explosionsartige Abplatzungen) und das Abschmelzen des Betons, einschließlich des Verlustes von gasförmigen Stoffen.

Abplatzungen wurden bei allen Versuchen insgesamt nur selten beobachtet.

Bei den Annäherungsversuchen traten gar keine Abplatzungen auf, es wurde lediglich das Auftreten feiner Risse beobachtet.

Bei den Eintauchversuchen wurden nur geringfügige Abplatzungen von Zuschlägen beobachtet. Nur bei einem Versuch mit einem quarzitischen Probekörper ohne Splitterschutzbewehrung und ohne Thermoelemente platzte etwa 2 min nach dem Eintauchen ein 10 cm langes Stück ab. Es fiel in die Stahlschmelze und schmolz an der Oberfläche an. Dabei wurde es mit Schlacke bedeckt und zeigte keine weiteren Reaktionen.

Das Schmelzen des Betons setzte, wie schon beschrieben, bei den Annäherungsversuchen wenige Minuten nach dem Annähern ein, bei den Eintauchversuchen sofort.

Schon bei der visuellen Beobachtung des Schmelzvorganges ließen sich Unterschiede in der Menge und der Konsistenz der entstehenden Betonschmelze feststellen. Bei dem kalzitischen Beton entwickelte sich nur wenig dünnflüssige Schmelze. Bei dem quarzitischen Beton entstand erheblich mehr Schmelze, die auch viel zähflüssiger erschien.

Mit der an die Absenkvorrichtung angebauten Kraftmeßdose wurde laufend der durch das Abschmelzen verursachte Gewichtsverlust der Probekörper gemessen. Nach dem Ende der Versuche wurde die Restlänge der Probekörper gemessen. Aus diesen Daten konnte eine Abschmelzgeschwindigkeit in g/min bzw. in mm/min berechnet werden. Es ergaben sich die in Tabelle 6 aufgeführten Abschmelzraten.

Daraus geht hervor, daß die Abschmelzraten bei den Norm-gelagerten Probekörpern größer sind als bei den vorgetrockneten Probekörpern; eine Folge der schon früher festgestellten insgesamt größeren Wärmeleitfähigkeit. Erwartungsgemäß sind die Abschmelzraten des kalzitischen Betons erheblich größer als die des quarzitischen Betons; eine Folge der Freisetzung von großen Mengen Kohlendioxid aus dem Kalkstein.

Die Werte der Versuche mit den Probekörpern ohne Splitterschutz sind etwa um das 5-fache größer als vergleichbare Werte. Für dieses unterschiedliche Verhalten sind zwei Effekte verantwortlich: zum einen wird durch das Metallgewebe der Wärmeübergang von der Stahlschmelze zum Beton verschlechtert, und dadurch die Temperaturverteilung im Betonprobekörper verändert. Zum anderen hält das Metallgewebe den Beton dicht zusammen und schützt ihn dadurch vor der aufschmelzenden Einwirkung der hohen Temperatur und vor mechanischen Einwirkungen durch die heftig bewegte Umgebung, die zu einer schnellen Abtragung der sowieso nur noch locker zusammenhängenden Einzelkomponenten des Betons führen.

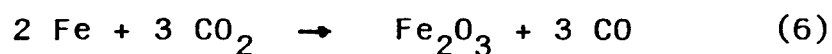
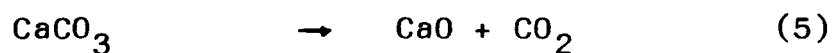
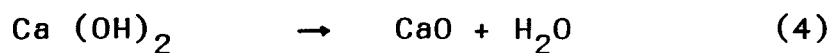
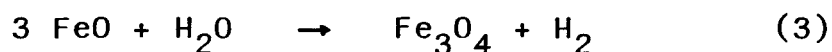
#### Schlacken:

Sowohl bei den Annäherungs- als auch bei den Eintauchversuchen reagierten geschmolzener Beton und geschmolzener Stahl miteinander. Das Produkt war eine Schlacke, die geborgen und chemisch analysiert wurde.

Das Ergebnis dieser Analysen ist auf Tabelle 7 wiedergegeben. Es zeigt den überwiegende Anteil des Siliziumoxids, der Eisenoxide und des Kalziumoxids an der Schlacke. Das Siliziumoxid und das Kalziumoxid stammen aus dem Beton, die Eisenoxide und das Aluminiumoxid aus der Stahlschmelze und das Magnesiumoxid aus der Ausstellung des Ofens.

Es ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Eisenverschlackung, d.h. der Menge der Eisenoxide, und der Zusammensetzung

des Betons zu erkennen. Wenn der Wert der Summe der Eisenoxidbestandteile zu dem Verhältnis  $\text{CaO/SiO}_2$  der Schlacken wiederum ins Verhältnis gesetzt wird, ergibt sich für den kalzitischen Beton ein Wert von 0,125 und für den quarzitischen Beton ein Wert von 0,012. Durch dieses Verhältnis wird die dünnere Konsistenz der Schlacke des kalzitischen Betons erklärbar, denn es ist aus dem Hüttenwesen bekannt, daß durch die Zusätze von Karbonaten die Schlacken des Hochofens dünnflüssiger gemacht werden. Die Schlackenzusammensetzung läßt sich näherungsweise nach den folgenden chemischen Gleichungen herleiten:



Die Gleichungen (5) und (6) gelten nur für den kalzitischen Beton. Da das gasförmige  $\text{CO}_2$  zusätzlich zu dem Wasser in großen Mengen austritt, wird auch verständlich, daß der kalzitische Beton weniger Schlacke in fester Form liefert.

Aussehen der Probekörper nach den Versuchen:

Die Probekörper glühten nach dem Entfernen aus dem Ofen noch kurze Zeit nach und bedeckten sich dann an diesen Teilen mit einer glasig erstarrten Schicht. Die Farbe des übriggebliebenen Betonkörpers war grau. Die Betonoberfläche zeigte feine Risse und zerbröckelte unter leichtem Druck.

#### 5.1.6 Zusammenfassung: zylindrische Probekörper

In einer Reihe von Versuchen mit Normalbetonen wurden Erkenntnisse und Erfahrungen darüber gesammelt, wie sich Beton unter extremen thermischen Einwirkungen verhält. Dazu wurden Betone mit quarzitischem und mit kalzitischem Zuschlag verwendet. In Vorversuchen wurde die thermische Belastung durch die Beflammung mit Azetylen-Sauerstoff-Brennern realisiert, und so der Beton Temperaturen bis zu 3000 Grad Celsius ausgesetzt. Hauptaufgabe der Untersuchungen aber war es, das Verhalten von Beton in Bezug auf seine Eigenschaften beim Angriff flüssiger Metalle zu studieren. Dazu wurden zylinderförmige Probekörper in eine Stahlschmelze von etwa 1600 Grad Celsius eingetaucht. Die bei der Wechselwirkung von Beton mit flüssigem Metall auftretenden Reaktionen wurden eingehend analysiert.

Die Reaktionen der Betone auf das Einwirken sehr hoher Wärmestromdichten lassen sich folgendermassen zusammenfassen:

- es wurde kein explosionsartiges Abplatzen von Betonstücken beobachtet,
- bei etwa 1200 Grad Celsius beginnt Beton zu schmelzen. Zuerst schmilzt die Zementsteinmatrix, dann der Zuschlag,
- der geschmolzene Beton bildet bei quarzitischem Beton relativ grosse Mengen zähflüssiger Schlacke, bei kalzitischem Beton eine kleinere Menge dünnflüssiger Schlacke. Der Unterschied in der Menge ist dadurch zu erklären, daß der Kalkstein sich hauptsächlich in  $\text{CaO}$  und das gasförmige  $\text{CO}_2$  zersetzt. Der Unterschied in der Konsistenz der Schlacke liegt im unterschiedlich hohen  $\text{CaO}$ -Anteil,
- die Schmelzgeschwindigkeit beträgt für quarzitisches Beton bis zu 44 mm/min, für kalzitisches Beton bis zu von 66 mm/min.

Die beim Eintauchen der Probekörper in die Schmelze auftretenden Reaktionen (Herausschleudern von Schmelztropfen, Schmelzen des Betons, Abbrennen einer bläulichen Flamme) sind zwar heftig, lassen sich aber durch einfache Schutzmassnahmen in ihren Auswirkungen begrenzen.



## 5.2 Versuche mit plattenförmigen Probekörpern

### 5.2.1 Versuchsprogramm

In diesem Teil des Forschungsvorhabens sollte festgestellt werden, wie sich Betonbehälter verhalten, die mit flüssigem Stahl gefüllt werden. Im speziellen interessierte dabei die Untersuchung der Schmelzfrontausbreitung in verschiedenen Betonen und die Erfassung der Phänomenologie der Reaktion Stahlschmelze-Beton. Dazu wurden plattenförmige Probekörper mit einem wannenartigen Hohlraum versehen. Das Verhältnis von Hohlraumvolumen zu benetzter Betonoberfläche wurde durch verschieden große Füllmengen flüssigen Stahls realisiert.

Der flüssige Stahl wurde durch Thermitreaktionen direkt in der Betonwanne hergestellt.

Untersucht wurden 3 Betone, die sich durch die Art der Zuschläge unterschieden: ein Quarzbeton, ein Kalksteinbeton und ein Basaltbeton.

Folgende Messungen und Beobachtungen wurden durchgeführt:

- Temperaturentwicklung im Beton,
- Verhalten der Stahlschmelze und des Betons,
- Dampf- und Gasentwicklung,
- Erosion der benetzten und unbenetzten Oberflächen,
- Abplatzungen der benetzten und unbenetzten Oberflächen,
- Abplatzungen und Risse in der Betonwanne,
- Gewichtsverlust der Probekörper,
- Physikochemische Umwandlungen in der Reaktionszone und der Wärmeeinflußzone.

### 5.2.2 Versuchstechnik

Entsprechend dem Programm wurden Probekörper mit einem wannenartigen Hohlraum hergestellt. Die Abmessungen, der konstruktive Aufbau, die Bewehrung und die Lage der einbetonierten Thermo-elemente sind auf Bild 15 dargestellt.

Es wurden Probekörper aus drei verschiedenen Betonen hergestellt: ein Normalbeton mit quarzitischem Zuschlag, wie er in Norddeutschland verwendet wird, und ein Normalbeton mit kalzitischem Zuschlag, wie er viel in Süddeutschland und in den USA verwendet wird.

Um einen Vergleich zu einem Beton mit einem besonders druckfesten und temperaturunempfindlichen Zuschlag zu haben, wurden Probekörper hergestellt, deren Zuschlag vorwiegend aus Basalt bestand. Im folgenden werden diese Betone vereinfachend als Quarz-, Kalkstein- und Basaltbeton bezeichnet.

Die betontechnologischen Daten aller 3 Betone sind auf Tabelle 8 angegeben. Gelagert wurden die Probekörper bei 20 Grad Celsius und 65 % relativer Feuchte.

In den Boden der Probekörper waren entsprechend Bild 15 Thermo-elemente einbetoniert, die über die Temperaturverteilung im Beton und über den Fortschritt der vermuteten Schmelzfront Auskunft geben sollten.

An einer Außenseite waren Meßmarken für Messungen mit dem Setzdehnungsmesser und ein Wellenleiter zur Ankoppelung der Schallemissionsanalysen-Anlage angebracht.

Alle Probekörper wurden vorher und nachher gewogen, um den Gewichtsverlust festzustellen. Das durchschnittliche Gewicht vor den Versuchen betrug 370 kg.

Der flüssige Stahl wurde mit Hilfe des aluminothermischen Verfahrens hergestellt. Dieses Verfahren erlaubt es, flüssigen Stahl von hoher Temperatur und fast beliebiger Menge ortsungebunden und ohne aufwendige Schmelzvorrichtungen zu erzeugen.

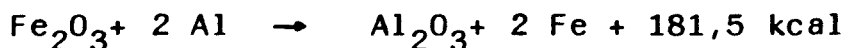
Das aluminothermische Verfahren, in der Praxis bekannt als Thermitverfahren zur Schweißung von Schienen und anderen massigen Eisen- und Stahlwerkstoffen, beruht auf der Methode der Reduktion von Schwermetallen aus ihren Oxiden mit Hilfe von Aluminium.

Diese Methode ist gekennzeichnet durch die Gleichung



Wird ein feinkörniges Gemisch aus Schwermetalloxiden und Aluminium in einem Reaktionsgefäß punktförmig entzündet, so wird eine exotherme Reaktion ausgelöst, bei der das Aluminium dem Schwermetalloxid den Sauerstoff entzieht, sich zu Aluminiumoxid umsetzt und das Schwermetall frei wird. Die bei der Reaktion entstehende Wärmemenge teilt sich fast ganz den Reaktionsprodukten mit, wodurch diese heißflüssig werden. Das Schwermetall sammelt sich innerhalb weniger Sekunden im unteren Teil des Reaktionsgefäßes, während das spezifisch leichtere Aluminiumoxid nach oben steigt und auf dem Schwermetall schwimmt.

Aus Gründen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse dieses Teils des Forschungsvorhabens mit den Ergebnissen der anderen Versuche wird hier bei der Anwendung des Thermitverfahrens Eisen als Schwermetall eingesetzt. Die Reaktionsgleichung erhält dann die Form



Dabei entsteht flüssiger Stahl mit einer Temperatur von etwa 2600 Grad Celsius.

Das Thermitgemisch aus präpariertem Eisenoxid und Aluminium wurde bei den Versuchen direkt in der Betonwanne entzündet, um Wärmeverluste zu vermeiden. Eingesetzt wurden Mengen zwischen 50 und 130 kg Thermit.

Der gesamte Versuchablauf wurde auf einer Videoanlage aufgezeichnet. Besonders auffallende Ereignisse wurden zudem fotografisch festgehalten.

### 5.2.3 Vorversuche

Erste Versuche mit wannenförmigen Betonstrukturen wurden in kleinerem Maßstab ausgeführt, um die experimentelle Durchführbarkeit der geplanten Hauptversuche zu prüfen.

Zur Durchführung dieser Versuche wurden aus Mörtelwürfeln, Kantenlänge 20 cm, Kerne mit Durchmesser 8 cm und einer Tiefe von 15 cm ausgebohrt. Die Würfel waren bei 20 Grad Celsius und 65 % rel. Luftfeuchtigkeit gelagert worden. Der Mörtel setzte sich zusammen aus Zement, Sand und Wasser im Verhältnis 1:3:0,5. In die ausgebohrten Löcher wurde das von einer Eisengießerei bereitgestellte flüssige Eisen mit einer Temperatur von etwa 1500 Grad Celsius eingegossen.

Das Eingießen des flüssigen Eisens in den Hohlraum im Beton gestaltete sich auf Grund des kleinen Durchmessers des Bohrloches schwierig. Das flüssige Eisen wurde immer wieder zu großen Teilen herausgeschleudert. Der Hohlraum ließ sich nur langsam füllen. Aus der Reaktionszone Beton-flüssiges Eisen kamen Dampf- und Rauchwolken.

Die beobachteten Reaktionen lassen sich folgendermaßen deuten: Durch das Eingießen des flüssigen Eisens in das Bohrloch wurde der umgebende Beton stark erwärmt. Dadurch wurde vor allem Wasser verdampft. Durch diesen Wasserdampf wurde das nachgegossene flüssige Eisen weggeschleudert. Wie bei vielen thermochemischen Nichtgleichgewichtszuständen ergaben sich die beobachteten Pulsationen. Erst nach ausreichender Erwärmung des Betons verblieb flüssiges Eisen unter Kocherscheinungen im Bohrloch und erstarrte bald auf Grund der Abkühlung durch die große Oberfläche zum Beton.

Nach dem Abkühlen wurden die Würfel einer ersten visuellen Inspektion unterworfen. Äußerlich waren keine Veränderungen gegenüber dem Ausgangszustand erkennbar. Es waren weder Risse noch Verfärbungen feststellbar. Deshalb wurden die Würfel durchgesägt. Es zeigte sich, daß Eisen nur an der Wandung des Hohlraums erstarrt war. Dieses erstarrte Eisen war locker mit dem umgebenden Mörtel verbunden, der in dieser etwa 2,5 mm dicken Zone bröckelig

und grau verfärbt war. Daran anschließend folgten eine etwa 4 mm dicke rötlich verfärbte, eine etwa 10 mm dicke blau verfärbte und schließlich die unbeschädigte Randzone. Alle diese genannten Erscheinungen sind auf Grund rein thermischer Einwirkungen entstanden; eine Reaktion des flüssigen Eisens mit einer Komponente des Mörtels konnte in den vorhandenen festen Bestandteilen nicht nachgewiesen werden.

Auf Grund der Erkenntnisse dieser Vorversuche -daß das Eingießen flüssigen Stahls in eine Betonwanne mit großen versuchs- und sicherheitstechnischen Schwierigkeiten verbunden ist, und daß die Dimensionen von Probekörper und Stahlmenge vergrößert werden müssen- wurde das endgültige Versuchsprogramm, wie es vorne beschrieben wurde, festgelegt.

#### 5.2.4 Versuchsdurchführung

Die Versuche fanden wegen der erwarteten Heftigkeit der Reaktionen in einem sonst Brandversuchen dienendem, temperaturfest ausgekleideten Prüfraum statt, der mit Beobachtungsfenstern und mit einem Abzug versehen war.

Die Probekörper wurden vor den Versuchen gewogen. Dann wurde die entsprechend dem Versuchsplan festgelegte Menge Thermit in den wannenförmigen Hohlraum eingefüllt und mit einem Entzündungsstäbchen gezündet.

Im folgenden werden nun verallgemeinernd und phänomenologisch die Reaktionsabläufe der Versuche beschrieben:

Etwa 8 sec nach Einstecken eines heiß brennenden Entzündungsstäbchens aus einer Bariumsuperoxid-Aluminium-Mischung in die Thermitmasse (8 kg bis ca. 130 kg) begann die Thermiteaktion, die etwa 20 s lang dauerte. In deren Verlauf wurden große Mengen Rauch und Dampf ausgestoßen, begleitet von einem heftigen Auswurf in Form

eines Funkenregens. Danach brachen Flammen durch den Rauch und größere Schmelzenteile wurden durch zerplatzende Blasen ausgeworfen. In zunehmendem Maße nahm die Rauchentwicklung ab, und nach etwa 50 s wurden die Flammen größer und klarer. Nach weiteren 50 s wurden auch die Flammen kleiner und loderten nur noch vereinzelt auf. Einzelne Flammen, die aus düsenähnliche Öffnungen der obliegenden Schlacke kamen, brannten noch 200 s nach Zündung stetig.

Die Heftigkeit der Reaktionen richtete sich a) nach der eingesetzten Menge Thermit und b) nach der Betonsorte. Die Reaktionen waren bei den Versuchen mit den großen Mengen Thermit erheblich heftiger als bei den Versuchen mit den kleinen Mengen Thermit. Bei dem Versuch mit 130 kg Thermit im Quarzbeton waren die Anfangsreaktionen so stark, daß sich der immerhin 360 kg schwere Probekörper deutlich von der Stelle bewegte. Die Versuche mit dem Kalksteinbeton waren gekennzeichnet durch eine besonders große Gasentwicklung, die durch eine klar brennende, mehrere Meter hohe Flamme erkennbar war.

Die Heftigkeit der Reaktionen wurde meßtechnisch erfaßt durch die Schallemissionsanalyse (SEA). Diese Meßmethode beruht auf dem Phänomen, daß infolge von Rißbildungen im Beton bei thermischer und mechanischer Belastung akustische Wellen ausgesendet werden. Diese mechanischen Wellen werden in einem Schallaufnehmer in ein elektrisches Signal umgewandelt, das nun weiterverarbeitet werden kann.

Für die in diesem Fall rein quantitative Auswertung wurden zwei Auswertverfahren angewendet: a) das Aufaddieren aller Rißimpulse zur Impulssumme und b) die Darstellung der Impulse pro Zeiteinheit als Impulsrate oder Schallemissionsaktivität.

Bild 16 zeigt die Impulssummen, aufgetragen über der Reaktionszeit. Es zeigt sich, daß die phänomenologische Bewertung der Heftigkeit der Reaktionen richtig war: größere Mengen Thermit bewirkten einen schnelleren Anstieg und eine größere Anzahl der Impulse. Es zeigt sich auch, daß nach etwa 1 min die Höchstzahl an Impulsen erreicht war, und die Impulssumme nur noch langsam größer wurde.

Auf Bild 17 ist die Schallemissionsaktivität dargestellt. Größere Thermitmengen bewirkten auch hier höhere Werte. Nach anfänglich

großen Impulsraten klingen die Schallemissionsaktivitäten fast immer kontinuierlich ab.

Ein qualitativer Vergleich der Ergebnisse der Schallemissionsanalyse der verschiedenen Betone ist allerdings nicht ohne weiteres möglich, da im vorliegenden Fall einige unabdingbar undefinierte versuchstechnische Parameter die Meßergebnisse empfindlich beeinflussen können.

Erst nach mehreren Minuten war es möglich, die Probekörper aus unmittelbarer Nähe in Augenschein zu nehmen. Zu erkennen war die erstarrte Schicht aus Aluminiumoxid, die den Hohlraum bedeckte. Aus dieser Schicht heraus brannten die schon oben erwähnten kleinen Flammen. Die Oberseite der Probekörper und deren Umgebung waren mit einer Schicht aus ausgeworfenen Schlackenteilchen bedeckt, die erstarrt waren und eine dichte Kruste bildeten.

Aus vier breiten Rissen an den dünnsten Stellen der Probekörper und aus mehreren kleineren Rissen trat Wasser in flüssiger Form aus. Erst nach mehreren Minuten strömte Dampf aus diesen Rissen und aus Öffnungen, die vorher nicht sichtbar gewesen waren.

Auf Grund der Anzeige der Thermoelemente konnte festgestellt werden, daß sich die Erwärmung der äußeren Zonen des Betons fortsetzte. Bis zur vollständigen Abkühlung der Probekörper auf Raumtemperatur vergingen etwa 25 Stunden.

#### 5.2.5 Temperaturentwicklung in den wannenförmigen Probekörpern

Wie schon bei der meßtechnischen Ausrüstung beschrieben, waren in den Boden der wannenförmigen Probekörper Thermoelemente eingebetoniert. Dadurch war es möglich die Temperaturentwicklung im Beton zu verfolgen.

Die Bilder 18 - 22 zeigen den Temperaturanstieg im Tiegelboden in den ersten 9 Minuten, die Bilder 23 - 28 den Temperaturverlauf in den ersten 140 Minuten nach Zündung des Thermitgemisches.

Zu berücksichtigen ist bei den Bildern, daß das Thermoelement 1 direkt am Tiegelboden installiert war und damit praktisch die Temperatur des Thermitgemisches anzeigte. Die Anzeige dieses Thermoelementes bestätigte die beobachtete Reaktionszeit des Thermits von weniger als 20 Sekunden, dem Abfrageintervall des Temperaturmeßsystems. Dies stimmt mit den Angaben der Literatur und des Herstellers überein.

Insgesamt zeigen alle Bilder, daß die Temperaturen im Beton in der Nähe des flüssigen Eisens sehr schnell und stetig steigen und hohe Werte erreichen. Als Folge der endlichen Wärmeleitfähigkeit und der relativ großen Wärmekapazität des Betons verlangsamt sich der Temperaturanstieg mit zunehmendem Abstand vom Tiegelboden. Die erreichten Maximaltemperaturen werden niedriger. Ein deutlicher Haltepunkt bei 100 Grad Celsius, bewirkt durch das Verdampfen des freien Wassers im Beton, ist nur in der Anzeige der weiter entfernt liegenden Thermoelemente erkennbar.

Die Temperaturen im oberen Teil des Tiegelbodens fallen nach Erreichen des Maximums schnell wieder ab, während die Temperaturen im unteren Teil noch längere Zeit steigen. Nach Stunden sind alle Temperaturen gleich hoch und es findet insgesamt eine Abkühlung statt.

Bei Betrachtung der Bilder lassen sich deutlich die Unterschiede in der Temperaturentwicklung erkennen, die durch die verschieden großen Mengen Thermit, entsprechend verschieden großer Temperaturbelastung, verursacht wurden. Bei großen Thermitmengen, also großer Wärmebelastung, steigen die Temperaturen schneller an und erreichen höhere Werte als beim Einsatz kleinerer Thermitmengen. Die Unterschiede in der Temperaturentwicklung bei den verschiedenen Betonen kommen nicht so klar heraus. Das liegt an der beschränkten Anzahl der Versuche, an meßtechnischen Problemen und wohl auch daran, daß bei solch hohen Temperaturbelastungen die Unterschiede bei den thermischen Materialwerten der einzelnen Betone nicht so sehr ins Gewicht fallen.

Aus dem Abstand der Kurven bei gleichen Temperaturen lassen sich die Geschwindigkeiten der Isothermen im Beton ablesen. Ebenfalls



aus den eben genannten thermischen Gründen verlangsamten sich die Isothermengeschwindigkeiten mit wachsendem Eindringen in den Beton: ein deutliches Zeichen für den hohen Wärmeverbrauch im Beton.

Auf den Tabellen 10 und 11 sind alle die Daten zusammengetragen, die die Temperaturentwicklung in den verschiedenen Betonen und bei verschieden großen Wärmebelastungen kennzeichnen. Es wurden dazu 4 Temperaturstufen herangezogen, die von Bedeutung für das Verhalten von Beton bei Temperaturbelastung sind:

- 100 Grad Celsius: der Beton erleidet seine erste maßgebliche Veränderung durch das Verdampfen des freien Wassers.
- 500 Grad Celsius: es erfolgt eine starke Festigkeitsminderung des Betons durch den Zerfall des Portlandits im Zementstein ( $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ ). Die Festigkeit bei 500 Grad Celsius beträgt nur noch etwa die Hälfte der Festigkeit bei Raumtemperatur.
- 800 Grad Celsius: ab 600 Grad Celsius findet ein verstärkter Gelabbau im Zementstein verbunden mit großen Festigkeitseinbußen statt. Zwischen 700 und 830 Grad Celsius zersetzt sich der Kalkstein ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ). Damit verbunden ist eine starke Gasentwicklung und ein Gewichtsverlust des Kalksteinbetons bis zu etwa 36 Gewichtsprozent.
- 1370 Grad Celsius: die Versagenstemperatur der verwendeten NiCr-Ni-Thermoelemente. Die Temperatur stimmt in etwa überein mit der Schmelztemperatur des Betons.

Aufgrund der Übereinstimmung von Versagenstemperatur der Thermoelemente und der Schmelztemperatur des Betons läßt sich die 1370 Grad-Isotherme gleichsetzen mit der Schmelzfrontgeschwindigkeit des Betons. Weiterhin wurde bei der Untersuchung der erkalteten Probekörper festgestellt, daß das Schmelzen des Betons der wesentliche Mechanismus der Abtragung (Erosion) des Betons ist. Es ist deshalb erlaubt, die Betonschmelzfrontgeschwindigkeit mit der Erosionsgeschwindigkeit gleichzusetzen.

Die Auswertung der Temperaturmessungen läßt folgende Aussagen zu:  
das erste Thermoelement ( direkt am Tiegelboden ) fällt bei allen

Versuchen sofort, innerhalb des ersten Meßtaktes, nach Zündung des Thermits aus. Das zweite Thermoelement ( 10 mm unter Tiegelboden ) fällt bei allen Versuchen innerhalb von 40 sec aus. Daraus ergibt sich eine Betonerosionsgeschwindigkeit von größer als 0,25 mm/sec. Das dritte Thermoelement ( 30 mm unter Tiegelboden ) fällt aus bei Versuch Q2 innerhalb von 80 sec, bei Versuch B1 innerhalb von 140 sec und bei Versuch B2 innerhalb von 240 sec. Daraus ergeben sich Betonerosionsgeschwindigkeiten von 0,375 mm/sec, von 0,2 mm/sec und von 0,125 mm/sec. Bei den Versuchen K1 und K2 fallen diese Thermoelemente nicht aus.

Insgesamt zeigt sich, daß die Temperaturhöhe eine entscheidende Rolle bei der Erosion des Betons spielt. Von weniger Einfluß ist die Sorte des Betons.

Zu beachten ist bei den hier geschilderten Untersuchungen, daß es sich um instationäre Vorgänge handelte. Die durch den heißen Stahl dargestellte Temperaturbelastung nahm sehr schnell ab. Bei Aufrechterhaltung der Temperatur des flüssigen Stahls durch interne oder externe Beheizung muß mit weit größeren Erosionsraten gerechnet werden.

#### 5.2.6 Untersuchung der erkalteten Probekörper

Nach dem Erkalten (nach etwa 25 Stunden) wurden die Probekörper einschließlich Eisen und Oxid gewogen. Auf Tabelle 12 sind alle Gewichtsangaben zusammengestellt.

Es zeigen sich die erwarteten Unterschiede in den Gewichtsänderungen bei den verschiedenen Betonsorten und den unterschiedlichen Temperaturbelastungen, verifiziert durch verschieden große Thermitmengen: während der Kalksteinprobekörper mit der großen Menge Thermit am stärksten an Gewicht verloren hat (Freisetzung großer Mengen von gasförmigen  $\text{CO}_2$ ), sind die Gewichtsverluste bei Basalt- und Quarzbetonprobekörpern nicht so

groß. Der geringe Gewichtsverlust des Kalksteinprobekörpers mit der kleinen Menge Thermit läßt sich mit der geringen Wärmeleitfähigkeit des Kalksteinbetons und dem daraus resultierenden flachen Eindringen der Temperaturfront erklären. Auch wird durch die Kalksteinentsäuerung viel Wärmeenergie verbraucht.

Die Ergebnisse von Laboruntersuchungen mit der Großthermowaage über die Gewichtsverluste der drei Betone sind in Bild 29 dargestellt. Wie die Kurven zeigen, bestätigen diese Untersuchungen die gemessenen Gewichtsänderungen der geprüften Probekörper.

Weiterhin wurden die Probekörper auf Risse untersucht. Alle Probekörper wiesen Risse auf. Die breitesten Risse zogen sich an den vier dünnsten Stellen der Wandungen senkrecht bis fast zum Boden herunter und setzten sich im Boden fort. Dort vereinigten sie sich etwa im Mittelpunkt und bildeten zusätzlich ein Netz feiner Risse. Ein schematisches Rissverteilungsbild, wie es für alle Probekörper ähnlich aussah, ist in Bild 30 dargestellt. Die breiten Risse hatten eine Breite von etwa 4 mm, die kleineren Risse waren etwa 1,5 - 2 mm breit.

Die Risse hatten natürlich auch Auswirkungen auf die durch den Setzdehnungsmesser abgelesenen Meßlängen.

Bild 31 zeigt die Anordnung der Meßstrecken, die durch den Setzdehnungsmesser vermessen wurden.

Auf Tabelle 13 sind die entsprechenden Werte nach Erwärmung und Wiederabkühlung aufgeführt. Daraus geht hervor, daß der Kalksteinbeton die geringsten thermischen Dehnungen zeigt. Quarz- und Basaltbeton zeigen in etwa gleiches, geringeres Dehnungsverhalten. Die bei der Erwärmung auftretenden Dehnungen gehen nach dem Erkalten zurück. In den meisten Fällen wurde nach dem Erkalten sogar ein Schrumpfen festgestellt, das kleine Risse wieder schließt.

Zur Überprüfung der mit dem Setzdehnungsmesser gemessenen Werte wurden die thermischen Dehnungen der 3 Betone an kleinen zylindrischen Probekörpern (Durchmesser 19 mm, Länge 40 mm) im Dilatometer gemessen. Auf Bild 32 sind diese Kurven dargestellt. Es zeigt sich die tendenzmäßige Übereinstimmung der Messungen. Es muß

allerdings beachtet werden, daß die Meßergebnisse nicht ohne weiteres vergleichbar sind: im Dilatometer handelt es sich um kleine Probekörper, die unbelastet geprüft werden. Beim größeren Probekörper ist der Beton schon durch Bewehrung und Einbau in größere Massen konstruktionsmäßig belastet. Zudem können Risse in der Meßstrecke das Ergebniss verfälschen.

Wie später festgestellt werden konnte, setzten sich die vier breiten Risse durch die gesamte Wandung fort, der Boden war von innen rissefrei.

Abplatzungen konnten nicht festgestellt werden.

Zur weiteren äußerlichen Beurteilung wurden die Probekörper entsprechend Bild 33 durchgesägt. Der Sägeschnitt längs der Außenflächendiagonalen wurde deshalb gewählt, weil er durch folgende Bereiche des geprüften Probekörpers führte:

- durch Bereiche des Betons mit verschiedenen Querschnitten,
- durch Bereiche mit verschiedenen Temperaturbelastungen,
- durch den oxidischen Regulus und die erstarrte Eisenschmelze,
- durch die breiten und schmalen Risse.

Dadurch war es möglich, folgende Kriterien zu beurteilen:

- Geometrie des geprüften Tiegels,
- Eindringtiefe der Schmelze und des Oxids, horizontal und vertikal,
- Reaktionszone Beton-Eisen,
- Reaktionszone Beton-Oxid,
- Veränderungen in der Betonstruktur, dehydratisierte Zonen,
- äußere Gestalt des erstarrten Eisens, des Oxids,
- Schliffbild des erstarrten Eisens, des Oxids,
- Rißbildung, Breite und Tiefe der Risse.

Nach der Begutachtung, der Vermaßung und der Dokumentation auf Film der durchtrennten Probekörper wurden die Bodenplatten der Tiegel abgetrennt. Diese Abtrennung gab Aufschluß über die verbliebene Festigkeit des Betonmaterials und der Bewehrung.

Nach Abtrennen der Bodenplatte ließ sich der gesamte Regulus her

ausbrechen. Dadurch wurde der Betonbereich, der direkt horizontal dem Angriff des flüssigen Eisens ausgesetzt war, sichtbar. Am freiliegenden Regulus konnte sodann auch eine Trennung des Metall- und des Oxidregulus erfolgen.

#### Beschreibung des Tiegelquerschnitts:

Bild 34 zeigt in schematischer Darstellung den Tiegelquerschnitt, der qualitativ für alle geprüften Tiegel folgendermaßen aussah:

die oberen Innenseiten der Tiegel waren mit einer Schicht bedeckt, die aus Aluminiumoxid bestand und durch Spritzer bei der Thermitreaktion entstanden war.

Den größten Raum nahm die Oxidmasse ein, die laut Röntgenbeugungsanalyse (siehe besonderes Kapitel) bei allen Betonen aus fast reinem Korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) bestand (einzelne Einschlüsse nicht berücksichtigt). Unterschiede gab es in der Struktur des Oxids: beim Basaltbeton gab es Bereiche des Oxids, die mit großen Poren (bis zu 10 mm Durchmesser) durchsetzt waren. Im übrigen Bereich war das Oxid dicht mit vielen kleinen Poren.

Beim Kalksteinbeton waren gleichmäßig im insgesamt dichten Oxid kleine Poren (2-3 mm Durchmesser) verteilt.

Beim Quarzbeton bot das Oxid ein ungleichmäßiges Porenbild. Während das Oxid nahe am Beton ganz dicht war, war es im oberen und mittleren Bereich stark porenhaltig mit unterschiedlich großen Poren. Außerdem waren etliche weiße Zuschlagsteine im Oxid, bei denen es sich um die Hochtemperaturquarzmodifikation Cristobalit handelte. Das Oxid nahm nach einer Lagerzeit von etwa einer Woche ein bräunliches Aussehen an, das auf die Oxidation von eingeschlossenen Eisenteilchen zurückzuführen ist.

Anhaftend unter dem Oxid befand sich das erstarrte Eisen. Nach Auseinanderbrechen des gesamten Regulus in den Metall- und den Oxidregulus zeigte der Metallregulus an der Kontaktfläche eine zwar ebene, aber stark zerklüftete, scharfkantige Oberfläche. Die Kontaktfläche des Oxidregulus war entsprechend der Negativabdruck dazu.

Die äußere Form des Metallregulus war eine Scheibe verschiedener Dicke, je nach eingesetzter Menge Thermit. Die Unterseite war einschließlich der Seitenflächen gewölbt und bestand aus kleinen (10-15 mm) gleichmäßig verteilten abgerundeten Erhebungen (Noppen) und Löchern (Poren). Der Metallregulus war optisch undurchlässig, doch zeigten erste orientierende Versuche mit Preßluft, daß sich Gas durchpressen ließ. Dies steht nicht in Widerspruch zu den dichten Schliffbildern, die von den Randzonen der Metallreguli gewonnen wurden.

Zwischen Eisen und Beton war ein Luftspalt (1-2 mm) und eine anthrazitfarbende Zwischenschicht, die am geschädigten Beton festhaftete. Während der Luftspalt seine Ursache im unterschiedlichen thermischen Ausdehnungsverhalten von Eisen und Beton hat, ist die Zwischenschicht ein Produkt der Reaktion zwischen Eisen und Beton bei hohen Temperaturen. Es handelt sich dabei im wesentlichen um Dicalciumferrit ( $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Nähere Ausführungen hierzu finden sich in dem Kapitel über die strukturanalytische Untersuchungen.

Im Bereich der Zwischenschichten gab es einige Unterschiede bei den einzelnen Betonen. Im Falle des Basaltbetons war die nicht ganz glatte Schicht unlösbar mit dem Beton verbunden. Bei dem Quarz- und dem Kalksteinbeton ließ sich die auf beiden Seiten glatte Zwischenschicht scherbenartig abbrechen. Die darunter liegende Fläche des Betons war glatt mit einer dünnen Schicht vollständig dehydratisierten Betons (gebundener Staub) bedeckt.

Daran schlossen sich weitere immer weniger dehydratisierte Zonen des Betons an, wie sie von thermisch geschädigten Betonen bekannt sind, und die an ihren Verfärbungen erkannt werden können. Dazu gehört auch ein als "stark geschädigte Zone" bezeichneter Bereich am Übergang Oxid-Spritzschicht. In diesem Bereich war der Beton besonders stark zerstört und brüchig. Hier zeigten sich auch die breitesten Risse, die bei Basaltbeton durch die Zuschlagkörner hindurchgingen. Dabei wiesen die Basaltzuschlagkörner in ihrem oberen Bereich Poren auf, was auf Entgasungserscheinungen schließen läßt.

Beim Ausbrechen der Bodenplatten zeigte sich ,daß hier der Beton erwartungsgemäß am stärksten geschädigt war und nur noch eine geringe Festigkeit hatte.

Der Bewehrungsstahl war in den Fällen hoher Temperaturbelastung stark verzundert und besaß nur noch geringe mechanische Festigkeit.

Alle ausgemessenen Bereiche sind in einer Übersicht auf Tabelle 14 dargestellt.

#### 5.2.7 Zusammenfassung: wannenförmige Probekörper

Wannenförmige Probekörper aus Quarzbeton, Kalksteinbeton und Basaltbeton wurden mit unterschiedlichen Mengen flüssigen Stahls gefüllt. Der flüssige Stahl mit einer Anfangstemperatur von etwa 2600 Grad Celsius wurde direkt in der Betonwanne durch Thermitreaktionen hergestellt.

Es wurde insbesondere der Frage nachgegangen, wie sich der gesamte Betonbehälter unter dieser extremen thermischen Einwirkung verhält. Dazu wurde das Verhalten der Stahlschmelze und des Betons beobachtet und die Heftigkeit der Reaktionen beurteilt. Die Temperaturentwicklung im Beton wurde gemessen, und daraus Temperaturentwicklungsgeschwindigkeit und Aufschmelzrate bestimmt. An den erkalteten Probekörpern wurden die geschädigten Zonen des Betons und die bei den Reaktionen entstandenen Schichten vermessen und analysiert.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die geprüften Betonstrukturen dem Angriff von flüssigem Stahl für eine bestimmte Zeit widerstehen können. Der Widerstand hängt in großem Maß von der Temperatur und der Menge des flüssigen Stahls und der Massigkeit der Betonstrukturen ab.

### 5.3 Laboruntersuchungen

Neben den Messungen, die direkt während der Versuche gemacht wurden, wurde eine Anzahl von Laboruntersuchungen durchgeführt, die helfen sollten, bestimmte Reaktionen zu erklären.

Einige dieser Untersuchungen wurden bereits an den betreffenden Textstellen erwähnt. Dazu gehören die Differential-Thermo-Analyse (DTA), die Thermogravimetrie (TG), die Messungen mit dem Dilatometer sowie naßchemische Analysen.

Weitere strukturanalytische Untersuchungen wurden mit Hilfe der Röntgendiffraktometrie durchgeführt. Damit ist es möglich, Veränderungen in den die Stoffe aufbauenden Phasen und ihre strukturelle Zusammensetzung zu erkennen. Allerdings kann nur das Vorhandensein kristalliner Phasen exakt nachgewiesen werden; amorphe Substanzen können nur teilweise erfaßt werden. Aus diesem Grund konzentrieren sich die Untersuchungen an Beton auf den Nachweis von Quarz und des allgemein gut kristallisierten Portlandits ( $\text{Ca(OH)}_2$ ).

Mit den Mitteln der DTA und der Röntgenbeugung wurden die geschädigten Zonen der Versuchskörper untersucht, die bei den Versuchen zu den Thermitversuchen geprüft wurden. Diese Untersuchungen wurden durchgeführt, um den Grad der Schädigung des Mörtels durch die thermische Belastung mit flüssigem Eisen festzustellen.

Dazu wurden aus vier signifikanten Bereichen der geschädigten Probekörper Material entnommen: aus der ungeschädigten Randzone als Bezugsbereich, aus der blauverfärbten Zone weiter innen, der rötlich verfärbten Zone noch weiter innen und der grau verfärbten Zone des Mörtels, der unmittelbar mit der Eisenschmelze in Kontakt war.

Mit Hilfe der DTA lassen sich die während der Erwärmung des Betons stattfindenden und auch die während einer früheren Erwärmung stattgefundenen Reaktionen meßtechnisch nachweisen. Das Ergebnis dieser Analysen ist auf Bild 35 dargestellt. Das obere Teilbild zeigt das DTA-Signal der ungeschädigten Randzone, nach unten



schließen sich die Signale der immer mehr geschädigten Zonen an. Als erstes fällt auf, daß der Entwässerungspeak bei 100 Grad Celsius nur in der ungeschädigten Randzone auftritt. Die anderen Zonen waren demnach alle wärmer gewesen. Der Portlanditpeak bei 500 Grad Celsius verschiebt sich zu tieferen Temperaturen und ändert auch sein Aussehen. Ein Hinweis darauf, daß mindestens die beiden letzten Zonen schon starke Schädigungen bei Temperaturen von über 500 Grad Celsius erlitten haben.

Der Quarzpeak bei 573 Grad Celsius tritt in allen Zonen auf.

Zu höheren Temperaturen hin wird die Interpretation der DTA-Signale schwieriger. Doch zeigt das Fehlen scharfer Peaks in den unteren Bildteilen, daß es sich dabei um stärker geschädigten Beton handelt.

Die selben Probenbereiche wurden auch röntgenografisch mit dem Röntgendiffraktometer untersucht. Die Ergebnisse sind auf Bild 36 dargestellt. Das oberste Teilbild zeigt das Beugungsbild der ungeschädigten Randzone. Die Quarzpeaks, hervorgerufen durch den hohen Sandanteil im Mörtel, überwiegen sowohl an Anzahl als auch an Intensität. Ebenfalls hervorgerufen durch den Sand werden die Peaks des Feldspats, eines Minerals, das aus wasserfreien Tonerdesilikaten aufgebaut ist. Die übrigen Peaks werden durch Bestandteile des Zementes ( $CH = Ca(OH)_2$ ,  $Cc = CaCO_3$ ) verursacht.

Beim Vergleich der Beugungsbilder der 4 Zonen zeigt sich, daß die Quarzpeaks kaum Veränderungen unterworfen sind. Auch beim Feldspat ergibt sich nur eine relative Intensitätsverschiebung der beiden Peaks untereinander.

Die durch den Zement verursachten Peaks zeigen hingegen Veränderungen. Die Intensitäten verringern sich mit zunehmender Schädigung der Zonen. Der Portlanditpeak ist im 4. Teilbild im Untergrundrauschen kaum noch erkennbar. Das bedeutet aber, daß diese Stoffe in größerem Umfang abgebaut wurden, diese Zonen also Temperaturen über 500 Grad Celsius ausgesetzt waren.

Auf Grund dieser Untersuchungsergebnisse und allgemeiner Erfahrungen lassen sich den 4 untersuchten Zonen folgende Temperaturbelastungen zuordnen: die ungeschädigte Zone war Temperaturen bis maximal 90 Grad Celsius ausgesetzt, die blau verfärbte

240-420 Grad Celsius, die rötlich verfärbte 450-490 Grad Celsius und die grau verfärbte 490-825 Grad Celsius.

Von den auf Bild 34 dargestellten und auf Tabelle 14 ausgemessenen Zonen der erkalteten Thermitprobekörper wurden einige Schichten genauer untersucht.

Das als Zwischenschicht bezeichnete Reaktionsprodukt von Beton und flüssigem Stahl war in seiner Zusammensetzung nicht bekannt. Im äußeren Erscheinungsbild gab es Unterschiede zwischen den Produkten der einzelnen Betone. Beim Quarzbeton war die Zwischenschicht plattenförmig zerklüftet und im Aufbau nicht homogen mit eingeschmolzenen Zuschlagskörnern. Beim Kalksteinbeton war die Zwischenschicht sehr gleichmäßig und dicht und ließ sich gut vom Untergrund ablösen. Beim Basaltbeton hatte sie mehr Poren und bedeckte als erstarrte Schmelze die basaltischen Zuschlagkörner.

Zur Analyse wurden pulverisierte Proben der Zwischenschichten in der DTA-Anlage untersucht. Die Ergebniskurven sind auf Bild 37 dargestellt. Die Kurven zeigen insgesamt wenig Peaks. Bei der Zwischenschicht des Quarzbetons gibt es bei 100 Grad Celsius eine Entwässerungsreaktion und bei 573 Grad Celsius den reversiblen Quarzpeak. Andere Reaktionen treten nur andeutungsweise auf.

Die Zwischenschicht des Kalksteinbetons zeigt auch die Entwässerung bei 100 Grad Celsius und dann, bis auf den Peak bei 350 Grad Celsius, eine gleichmäßig verlaufende Kurve bis 520 Grad Celsius. Der Peak bei 780 Grad Celsius ist auf die beginnende Kalksteinentsäuerung zurückzuführen.

Die Zwischenschicht des Basaltbetons hat nur bei 350 Grad Celsius einen stark exothermen Peak. Die kleineren exothermen Peaks ab etwa 1000 Grad Celsius sind auf Entgasungserscheinungen des Basalts zurückzuführen.

Zur weiteren Identifizierung wurden die pulverisierten Zwischenschichtproben mit Hilfe der Röntgenfeinstrukturanalyse untersucht. Daraus ergaben sich folgende Ergebnisse: in der Zwischenschicht des Quarzbetons konnte röntgenografisch nur Quarz ( $\text{SiO}_2$ ) und dessen Hochtemperaturmodifikation Cristobalit festgestellt werden.

~~Spezielle Nachforschungen ergaben, daß es sich dabei um die als~~

"weißer Zuschlag" gefundenen Teile aus Zwischenschicht, Metall- und Oxidregulus handelte. Wegen dieses häufigen Vorkommens des Cristobalits wurde besondere Aufmerksamkeit auf die Existenzbereiche dieser Quarzmodifikation gerichtet. Bild 38 zeigt die Temperaturbereiche, in denen die einzelnen Modifikationen entweder stabil (durchgezogene Linien) oder metastabil (gestrichelt) existieren. Danach bildet sich der Cristobalit bei 1470 Grad Celsius und existiert bei Raumtemperatur in einer metastabilen Form.

Die Zwischenschicht von flüssigem Stahl und Kalksteinbeton besteht neben Eisenoxidteilchen (Wüstit,  $\text{FeO}$ ) hauptsächlich aus der Verbindung Dicalciumferrit. Calciumferrite sind als Bestandteile des Portlandzementklinkers in der Betontechnologie bekannt. Bei den hier betrachteten Reaktionen treffen jedoch die im Eisenhüttenwesen bekannten Verbindungen eher zu. Danach bildet sich das hier nachgewiesene Dicalciumferrit aus der Reaktion zwischen  $\text{CaCO}_3$  und  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Davon ist das Calciumkarbonat im Beton enthalten und das Eisenoxid hat sich aus der Reaktion von dem aus dem Beton entweichenden Wasser und dem flüssigen Stahl gebildet.

Die Zwischenschicht des Basaltbetons war aus Eisensilikat ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ , mineralogischer Name Fayalit) und Calciumsilikat ( $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ , mineralogischer Name Hedenbergit) aufgebaut.

Zum Vergleich wurden zwei Proben von Zwischenschichten untersucht, die im Kernforschungszentrum Karlsruhe bei ähnlichen Versuchen mit quarzitischem Beton entstanden waren. In der einen, schwarzen Probe wurde Eisenoxid ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , Magnetit) und ein Eisenhydroxid (Gamma- $\text{FeOOH}$ ) mit dem mineralogischen Namen Lepidokrokit analysiert. In der anderen, anthrazitfarbenen Probe wurde wie bei den eigenen Zwischenschichten Eisensilikat ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ , Fayalit) und Quarz nachgewiesen.

Die röntgenografische und mikroskopische Untersuchung der Spritzschichten an den Hohlraumwänden erbrachten neben zahlreichen nicht identifizierbaren Röntgenpeaks als Reaktionsprodukte Diopsid ( $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ ) beim Basaltbeton und das auch in Hochofenschlacken auftretende Melilith ( $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ ) beim Kalksteinbeton, sow Sapphirin ( $4\text{MgO} \cdot 5\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ), das sich in größerer Entfernung zur Betonwandung in einem porenreichem Gebiet befand. Sapphirin bildet sich aus Schmelzen, die heißer als 1470 Grad Celsius sind.

## 6 Zusammenfassung

Die in diesem Forschungsvorhaben durchgeführten Versuche dienten der Sammlung von Erkenntnissen und Erfahrungen über das Verhalten von Beton unter extremen thermischen Einwirkungen.

Solche Einwirkungen sind als Katastrophenbeanspruchungen, z.B. als Folge eines hypothetischen Coreschmelzens in Kernkraftwerken, vorstellbar.

Es war somit der Frage nachzugehen, wie Beton unter solchen Einwirkungen reagiert, und welche kritischen Materialsituationen auftreten. Insbesondere sollte eine Antwort auf die Frage gegeben werden, ob Metallschmelzen dickwandige Strukturen zerstören und durchdringen können.

Die Mannigfaltigkeit der angesprochenen Probleme machte es notwendig, sich auf einige wichtige Teilaspekte zu konzentrieren. So wurde wegen der nicht zu hohen Investitionskosten das Verhalten von Beton unter der Einwirkung von flüssigem Stahl mit Temperaturen bis zu 2600 Grad Celsius untersucht. Untersuchungen mit anderen flüssigen Metallen (Natrium) sind in der Zukunft sinnvoll.

Für die hier vorliegenden Untersuchungen wurden insgesamt 3 Betone geprüft: jeweils ein Beton mit überwiegend quarzitischem, kalzitischem und basaltischem Zuschlag.

Es wurden zwei Probekörpergeometrien verwendet: zylindrische Probekörper, die in eine Stahlschmelze getaucht wurden und wegen ihrer einfachen und symmetrischen Form unkompliziertes Experimentieren und effektives wissenschaftliches Auswerten zulassen, und plattenförmige Probekörper mit einem wannenförmigen Hohlraum (Betontiegel), die mit flüssigem Stahl gefüllt wurden.

Die Stahlschmelzen von 1600 Grad Celsius wurden dabei in einem Induktionsofen, die von 2600 Grad Celsius mit Hilfe des aluminothermischen Verfahrens direkt in den zu prüfenden Betontiegeln erzeugt.

Während und nach den Reaktionen wurden folgende Messungen und Untersuchungen durchgeführt:

- Kinetik der Reaktionen,
- Verhalten der Stahlschmelzen und des Betons,
- Dampf- und Gasentwicklung,
- Temperaturentwicklung und -verteilung im Beton,
- Abplatzungen und Risse in den Betonstrukturen,
- Gewichtsverlust der Probekörper,
- Schmelzfrontausbreitung und Erosionsgeschwindigkeit,
- Geometrien der Probekörper nach dem Erkalten,
- Physikochemische Umwandlungen in verschiedenen Zonen des Betons,
- Zusammensetzung der Reaktionsprodukte Beton-Stahlschmelze.

Die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchungen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

Beton reagiert heftig auf die schockartige Belastung mit hohen Temperaturen und hohen Wärmestromdichten. Er setzt dabei große Mengen Wasserdampf und brennbare Gase frei.

Bei etwa 1200 Grad Celsius beginnt Beton zu schmelzen. Zuerst schmilzt die Zementsteinmatrix, dann die Zuschläge, von denen allerdings einige (z.B. die Quarzhochtemperaturmodifikation Cristobalit) bis zu 1700 Grad Celsius fest bleiben.

Die Schmelzen der verschiedenen Betone unterscheiden sich in ihrer Konsistenz und ihrer in flüssiger Form vorliegenden Menge.

Die Ausgangstemperatur der Stahlschmelze beeinflusst erheblich die Kinetik der Reaktionen.

Durch Wärmeverluste an die Umgebung und durch den endothermen Charakter der Reaktionen, kommen die Wechselwirkungen des Betons mit der Stahlschmelze nach einiger Zeit zum Stillstand. Durch Wärmezufuhr könnte ein stationärer Zustand hergestellt werden. Dies würde aber nur durch einen sehr hohen Energieeintrag möglich sein.

Die Temperaturentwicklung im Beton war im wesentlichen abhängig von der Betonsorte, von der Vorbehandlung des Betons und vom Wärmeangebot.

Der Gewichtsverlust war erwartungsgemäß bei dem Kalksteinbeton durch die Freisetzung großer Mengen Kohlendioxids am größten.

Die Abschmelz- bzw. Erosionsgeschwindigkeiten betrugen bis zu 66 mm/min bei den Eintauchversuchen und bis zu 30 mm/min bei den Einfüllversuchen.

Die festgestellten Umwandlungen in tieferen Zonen des Betons entsprachen denen, die auf Grund allein thermischer Einwirkungen bekannt sind.

Die Analysen der Reaktionsprodukte aus den Grenzschichten ergaben deutliche Unterschiede in der Zusammensetzung der von kalzitischen und der von quarzitischen Beton stammenden Schlacken. Sie bestehen hauptsächlich aus Ferriten und Silikaten.

Die durchgeführten Versuche haben dazu beigetragen, Erkenntnisse über die Eigenschaften des Werkstoffs Beton bei extremen thermischen Einwirkungen zu gewinnen und die dabei ablaufenden Reaktionen zu verstehen. Die Versuche haben gezeigt, daß Beton in der Lage ist, solchen extremen thermischen Einwirkungen, insbesondere auch dem Angriff flüssiger Metalle, zu widerstehen. Allerdings muß dieser Widerstand mit einem zum Teil erheblichen Verlust an Substanz erkauft werden und ist dadurch zeitlich und örtlich begrenzt.

Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, ausreichende Mengen qualitätsgerechten Betons in Form von schützenden Strukturen zur Verfügung zu stellen und dafür Sorge zu tragen, daß gasförmige Reaktionsprodukte abgeführt werden.

Die hier wiedergegebenen Zahlen gelten naturgemäß nur für die untersuchten Betone. Sie können in Grenzen verallgemeinert werden. Es ist auf Grund der Ergebnisse der hier beschriebenen Untersuchungen jedoch möglich, die zu einer schützenden Wirkung notwendigen Dimensionen und Qualitäten des Werkstoffs Beton unter extremen Temperaturbedingungen zumindest tendenzmäßig richtig abzuschätzen.

Braunschweig, im Dezember 1982

Dipl.-Physiker Ehm

## Literatur

- [1] Schneider, U., et al.: "Hochtemperaturverhalten von Festbeton", Arbeitsbericht B 3 des SFB 148, Technische Universität Braunschweig (1980).
- [2] Proceedings of the third Post-Accident Heat Removal "Information Exchange". Argonne National Laboratory, November 1977.
- [3] Hildenbrandt, G., et al.: "Untersuchung der Wechselwirkung von Kernschmelze und Reaktorbeton", Abschlußbericht - Förderungsvorhaben BMFT RS 154, KWU, Erlangen, Mai 1978, s.a. Peehs, M.; Skokan, A., Reimann, M.: "Investigations in Germany of the Barrier Effect of Reactor Concrete against Propagating Molten Corium in the Case of a Hypothetical Core Meltdown Accident of a LWR", ENS/ANS Int. Top. Meeting on Nuclear Power Reactor Safety, Brüssel, 16. - 19.10.1978, Vol. 1.
- [4] Kordina, K., Schneider, U.: "Zum Verhalten von massigen Betonstrukturen im Hochtemperaturbereich". Bericht des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Juni 1977.
- [5] HTGR Accident Initiation and Progression Analysis Status Report, General Atomic Project 3219, January 1976.
- [6] Schneider, U., Diederichs, U., und Weiß, R.: Sonderforschungsbereich 148 "Brandverhalten von Bauteilen", Arbeitsbericht 1975/77, Teil II, B 3-1 bis B 3-95, Braunschweig, 1977.
- [7] Schneider, U., Kordina, K.: "Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des 'Konstruktionsbetons 2.3' für den SNR-Kalkar", Untersuchungsbericht, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1976.
- [8] Zement, Taschenbuch 1974/75, Verein Deutscher Zementwerke, Bauverlag GmbH, Wiesbaden - Berlin 1974.
- [9] Schiele, E., und L.W. Berens: "Kalk - Herstellung - Eigenschaften Verwendung", Verlag Stahleisen mbH., Düsseldorf, 1972.



## Tabellen

- 1 Zusammensetzung eines kalzitischen Reaktorbetons
- 2 Umwandlungs- und Zersetzungsreaktionen von kalzitischem Beton
- 3 Umwandlungs- und Zersetzungsreaktionen von quarzitischem Beton
- 4 Betontechnologische Daten der zylindrischen Probekörper
- 5 Übersicht über die Versuche mit zylindrischen Probekörpern
- 6 Abschmelzraten der zylindrischen Probekörper
- 7 Schlackenanalysen
- 8 Betontechnologische Daten der wannenförmigen Probekörper
- 9 Übersicht über die Versuche mit wannenförmigen Probekörpern
- 10 Zeiten bis zum Erreichen von 100, 500, 800 und 1370 °C
- 11 Geschwindigkeiten der Temperaturfronten im Betontiegel
- 12 Gewichtsangaben für Thermitversuche
- 13 Änderungen der Meßlängen
- 14 Bereiche der geprüften Tiegel

T a b e l l e 1

Zusammensetzung eines kalzitischen Reaktorbetons

Stoff	Körnung	Gehalt
Zement: HOZ 450 L		350 kg/m <sup>3</sup>
Rheinsand	0 - 2 mm	275 kg/m <sup>2</sup>
Kalkstein-Brechsand	0 - 2 mm	375 kg/m <sup>3</sup>
Kalkstein-Splitt	2 - 5 mm	300 kg/m <sup>3</sup>
Kalkstein-Splitt	8 - 11 mm	545 kg/m <sup>3</sup>
Kalkstein-Splitt	16 - 22 mm	375 kg/m <sup>3</sup>
EFA-Füller (RM)		50 kg/m <sup>3</sup>
Gesamtwasser		170 kg/m <sup>3</sup>
Zusatzmittel: BV		4 cm <sup>3</sup> /kg Zement

Tabelle 2: Umwandlungs- und Zersetzungsreaktionen von calcitischen Beton (Massenbeton) auf Hochofenzementbasis

Temperaturbereich [°C]	Umwandlungs- oder Zersetzungsreaktion	Wärmetönung	Reaktions-/Umwandlungswärme [kJ/kg]	Reaktions-/Umwandlungswärme [MJ/m <sup>3</sup> Beton]	umgesetzte Menge pro m <sup>3</sup> Beton
30 - 120	Verdunstung bzw. Verdampfung von physikalisch gebundenem Wasser	endotherm	Verdampfungswärme von Wasser ca. 2258	290	ca. 130 kg Wasser
30 - 300	Gelabbau, Dehydratation 1. Stufe	endotherm	Hydratationswärme ca. 250	20	< 78 kg "Zementstein"
120 - 600	Abgabe von zeolithisch gebundenem bzw. chemisorbiertem Wasser	endotherm	Verdampfungswärme von Wasser > 2258	135	ca. 60 kg Wasser
450 - 550	Portlandit-zersetzung $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	endotherm	ca. 1000	< 40	< 40 kg CaO
570	Quarzumwandlung $\alpha \text{ BS}_1\text{O}_2$	endotherm	5,9	1,2	ca. 200 kg Quarzit
600 - 700	Zersetzung der CSH-Phasen Bildung von $\beta\text{-C}_2\text{S}$	endotherm	Hydratationswärme ca. 500	120	< 240 kg "Zementstein"
um 780	Rekristallisation der Reste der glasartig erstarrten Hochofenschlacke	exotherm	Rekristallisationswärme ca. 50	5	< ca. 100 kg unhydratisierter Hüttensand
600 - 900	Entsäuerung des Kalksteins $\text{CaCO}_3 + \text{CaO} + \text{CO}_2$	endotherm	Zersetzungswärme 1637	2.360	1600 kg Kalkst. $\text{CaCO}_3$ -Anteil ca. 90 %
ab 1100-1200	Schmelzen des Betons Bildung glasartiger Substanzen	endotherm	Schmelzwärme 500 - 1000	1.575	ca. 2100 kg

Tabelle 2: Umwandlungs- und Zersetzungsreaktionen von calcitischem Beton (Massenbeton) auf Hochofenzementbasis

Temperaturbereich [°C]	Umwandlungs- oder Zersetzungsreaktion	Wärmetönung	Reaktions-/Umwandlungswärme [kJ/kg]	Reaktions-/Umwandlungswärme [MJ/m <sup>3</sup> Beton]	umgesetzte Menge pro m <sup>3</sup> Beton
30 - 120	Verdunstung bzw. Verdampfung von physikalisch gebundenem Wasser	endotherm	Verdampfungswärme von Wasser ca. 2258	290	ca. 130 kg Wasser
30 - 300	Gelabbau, Dehydratation 1. Stufe	endotherm	Hydratationswärme ca. 250	20	< 78 kg "Zementstein"
120 - 600	Abgabe von zeolithisch gebundenem bzw. chemisorbiertem Wasser	endotherm	Verdampfungswärme von Wasser > 2258	135	ca. 60 kg Wasser
450 - 550	Portlanditzerersetzung $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	endotherm	ca. 1000	< 40	< 40 kg CaO
570	Quarzumwandlung $\alpha \text{ BS}_1\text{O}_2$	endotherm	5,9	1,2	ca. 200 kg Quarzit
600 - 700	Zersetzung der CSH-Phasen Bildung von $\beta\text{-C}_2\text{S}$	endotherm	Hydratationswärme ca. 500	120	< 240 kg "Zementstein"
um 780	Rekristallisation der Reste der glasartig erstarrten Hochofenschlacke	exotherm	Rekristallisationswärme ca. 50	5	< ca. 100 kg unhydratisierter Hüttensand
600 - 900	Entsäuerung des Kalksteins $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$	endotherm	Zersetzungswärme 1637	2.360	1600 kg Kalkst. $\text{CaCO}_3$ -Anteil ca. 90 %
ab 1100-1200	Schmelzen des Betons Bildung glasartiger Substanzen	endotherm	Schmelzwärme 500 - 1000	1,575	ca. 2100 kg

Tabelle 3: Umwandlungs- und Zersetzungsreaktionen von quarzitischem Beton (Massenbeton) auf Hochofenzementbasis

Temperaturbereich [°C]	Umwandlungs- oder Zersetzungsreaktion	Wärmetönung	Reaktions-/Umwandlungswärme [kJ/kg]	Reaktions-/Umwandlungswärme [MJ/m <sup>3</sup> Beton]	umgesetzte Menge pro m <sup>3</sup> Beton
30 - 120	Verdunstung bzw. Verdampfung von physikalisch gebundenem Wasser	endotherm	Verdampfungswärme von Wasser ca. 2258	290	ca. 130 kg Wasser
30 - 300	Gelabbau, Dehydratation 1. Stufe	endotherm	Hydratationswärme ca. 250	20	< 78 kg "Zementstein"
120 - 600	Abgabe von zeolithisch gebundenem bzw. chemisorbiertem Wasser	endotherm	> 2258	135	ca. 60 kg Wasser
450 - 550	Portlandit-zersetzung $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	endotherm	ca. 1000	< 40	< 40 kg CaO
570	Quarzumwandlung $\alpha\text{-BSiO}_2$	endotherm	5,86	8,8	ca. 1500 kg Quarzit
600 - 700	Zersetzung der CSH-Phasen Bildung von $\beta\text{-C}_2\text{S}$	endotherm	Hydratationswärme ca. 500	120	< 240 kg "Zementstein"
um 780	Rekristallisation der glasartig erstarrten Hochofenschlacke	exotherm	Rekristallisationswärme ca. 50	5	ca. 100 kg
ab 1100-1200	Schmelzen des Betons, Bildung glasartiger Substanzen	endotherm	Schmelzwärme 500 - 1000	1.575	ca. 2100 kg

Tabelle 3: Umwandlungs- und Zersetzungsreaktionen von quarzitischem Beton (Massenbeton) auf Hochofenzementbasis

Temperaturbereich [°C]	Umwandlungs- oder Zersetzungsreaktion	Wärmetönung	Reaktions-/Umwandlungswärme [kJ/kg]	Reaktions-/Umwandlungswärme [MJ/m <sup>3</sup> Beton]	umgesetzte Menge pro m <sup>3</sup> Beton
30 - 120	Verdunstung bzw. Verdampfung von physikalisch gebundenem Wasser	endotherm	Verdampfungswärme von Wasser ca. 2258	290	ca. 130 kg Wasser
30 - 300	Gelabbau, Dehydratation 1. Stufe	endotherm	Hydratationswärme ca. 250	20	< 78 kg "Zementstein"
120 - 600	Abgabe von zeolithisch gebundenem bzw. chemisorbiertem Wasser	endotherm	> 2258	135	ca. 60 kg Wasser
450 - 550	Portlanditzerersetzung $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	endotherm	ca. 1000	< 40	< 40 kg CaO
570	Quarzumwandlung $\alpha \rightarrow \beta \text{SiO}_2$	endotherm	5,86	8,8	ca. 1500 kg Quarzit
600 - 700	Zersetzung der CSH-Phasen Bildung von $\beta\text{-C}_2\text{S}$	endotherm	Hydratationswärme ca. 500	120	< 240 kg "Zementstein"
um 780	Rekristallisation der glasartig erstarrten Hochofenschlacke	exotherm	Rekristallisationswärme ca. 50	5	ca. 100 kg
ab 1100-1200	Schmelzen des Betons, Bildung glasartiger Substanzen	endotherm	Schmelzwärme 500 - 1000	1.575	ca. 2100 kg

Tabelle 4: Betontechnologische Daten der zylindrischen Probekörper

		quarzitischer Beton	kalzitischer Beton
Zement PZ 35 F	[kg/m <sup>3</sup> ]	363	358
Sand 0/2	[kg/m <sup>3</sup> ]	640	562
Kies 2/8	[kg/m <sup>3</sup> ]	490	938
Kies 8/16	[kg/m <sup>3</sup> ]	760	375
Gesamtwasser	[kg/m <sup>3</sup> ]	222	215
W/Z-Wert	-	0,61	0,60
Festbetonrohddichte (28 Tage)	[kg/dm <sup>3</sup> ]	2,37	2,33
Würfelfestigkeit (28 Tage)	[N/mm <sup>2</sup> ]	65,0	48,0
Alter bei VD	[d]	124	131

Tabelle 5: Übersicht über die Versuche mit zylindrischen Probekörpern

Versuch Nr.	Beton	Lagerung	Belastung	Bemerkung
1	quarz.	trocken, 105 °C	eingetaucht	Erfahrungsversuch
2	quarz.	trocken, 105 °C	angenähert	-
3	quarz.	trocken, 105 °C	eingetaucht	leichte Reaktion
4	quarz.	Norm	angenähert	-
5	quarz.	Norm	eingetaucht	wird ausgebrochen
6	kalz.	trocken, 105 °C	angenähert	-
7	kalz.	Norm	nachgefahren	-
8	kalz.	trocken, 105 °C	nachgefahren	-
9	kalz.	Norm	nachgefahren	-
10	kalz.	trocken, 105 °C	eingetaucht	heftige Reaktion
11	kalz.	Norm	eingetaucht	ohne Bewehrung
12	quarz.	Norm	eingetaucht	ohne Bewehrung
13	quarz.	Norm	eingetaucht	heftige Reaktion



Tabelle 6: Abschmelzraten

Versuchsart	Nachfahren				Eintauchen			
Beton mit Splitterschutz	quarz.		kalz.		quarz.		kalz.	
Lagerung	Norm	trocken	Norm	trocken	Norm	trocken	Norm	trocken
mm/min	0,8	0,2	3,8	3,2	11,3	1,5	8,6	4,8
g/min	10,7	2,4	44,5	37,4	134,6	17,8	100,7	56,2
Beton ohne Splitterschutz								
mm/min					43,5		66,6	
g/min					518,2		780,0	

Tabelle 7: Schlackenanalysen

Beton	Chemische Zusammensetzung (Gew.-%)										
	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Gran.	Glühverlust
quarz., Norm-gelagert	11,87	6,99	52,98	5,92	9,72	6,25	0,49	0,39	0,67	0,0	-
kalz., vorgetrocknet	4,21	1,14	45,96	7,46	26,29	10,64	3,38	0,15	0,52	0,0	0,24
kalz., Norm-gelagert ohne Splitterschutz	4,34	1,90	36,70	4,46	33,44	12,04	1,22	0,18	0,54	0,0	4,96
quarz., Norm-gelagert ohne Splitterschutz	13,14	6,82	41,12	5,13	12,15	19,51	1,40	0,22	0,43	0,0	-

Tabelle 8: Betontechnologische Daten der wannenförmigen Probekörper

			Beton			
			Quarz		Basalt	Kalkstein
			I	II		
Zement PZ 35 F		[kg/m <sup>3</sup> ]	260	360	350	358
Gesamtwasser		[kg/m <sup>3</sup> ]	190	220	175	215
W/Z-Wert		[-]	0,73	0,61	0,5	0,6
quarz. Zuschlag	0/2	[kg/m <sup>3</sup> ]	923	652	731	-
quarz. Zuschlag	2/8	[kg/m <sup>3</sup> ]	191	500	385	-
quarz. Zuschlag	8/16	[kg/m <sup>3</sup> ]	768	768	-	-
Basaltsplitt	8/11	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	635	-
Basaltsplitt	11/16	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	173	-
kalz. Zuschlag	0/2	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	562
kalz. Zuschlag	2/8	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	938
kalz. Zuschlag	8/16	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	375
Flugasche		[kg/m <sup>3</sup> ]	60	-	-	-
Rohdichte (28 Tage)		[kg/dm <sup>3</sup> ]	2,39	2,39	2,53	2,47
Würfelfestigkeit (28 Tage)		[N/mm <sup>2</sup> ]	46	54	61	45
Alter bei VD		[d]	108	152	140	158

Tabelle 9: Übersicht über die Versuche mit plattenförmigen Probekörpern

Versuch-Nr.	Beton	Thermit [kg]	Bemerkung
0/Q 1	Quarz	8	Erfahrungsversuch
1/B 1	Basalt	50	} kaum Auswürfe, große Flammen
2/B 2	Basalt	100	
3/K 1	Kalkstein	50	} viel Auswürfe, große Flammen
4/K 2	Kalkstein	100	
5/Q 2	Quarz	130	sehr heftige Reaktion

Tabelle 10: Zeiten bis zum Erreichen von 100 °C, 500 °C, 800 °C und 1370 °C im Betontiegel (in s)

Temperatur		100 °C						500 °C						800 °C						1370 °C					
Ver- such	Thermoele- ment	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
	0/Q 1	20	40	120	220	320	340	-	140	-	-	-	-	-	220	-	-	-	-	-	-	200	-	-	-
	1/B 1	< 20	< 20	90	260	520	820	< 20	< 20	160	1200	3600	-	< 20	< 20	180	-	-	-	< 20	< 20	200	-	-	-
	2/B 2	< 20	< 20	60	200	520	720	< 20	< 40	80	520	2880	4680	< 20	< 40	100	1680	-	-	< 20	40	240	-	-	-
	3/K 1	< 20	20	120	520	980	1240	< 20	< 40	620	4720	-	-	< 20	< 40	-	-	-	-	< 20	< 40	-	-	-	-
	4/K 2	< 20	-	-	-	-	610	< 20	-	-	-	-	7200	< 20	-	-	-	-	-	< 20	-	-	-	-	-
	5/Q 2	< 20	< 20	70	130	240	420	< 20	< 40	<80	160	800	1620	< 20	< 40	<80	<200	1380	-	< 20	< 40	< 80	<200	-	-

**Tabelle 11:** Geschwindigkeiten der Temperaturfronten im Betontiegel (in mm/min)

Temperatur		100 °C						500 °C						800 °C						1370 °C					
Ver- such	Thermoele- ment	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
		-	22,5	12,5	9,55	8,44	9,70	-	6,42	-	-	-	-	-	4,09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0/Q 1		-	22,5	12,5	9,55	8,44	9,70	-	6,42	-	-	-	-	-	4,09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1/B 1		-	>30,0	20,0	11,5	8,07	6,58	-	>30,0	11,2	2,50	1,16	-	-	>30,0	10,0	-	-	-	-	>30,0	9,0	-	-	-
2/B 2		-	>30,0	30,0	15,0	8,07	7,50	-	>15,0	22,5	5,76	1,45	1,15	-	>15,0	18,0	1,78	-	-	-	15,0	7,5	-	-	-
3/K 1		-	30,0	15,0	5,76	4,28	4,35	-	>15,0	2,9	0,63	-	-	-	>15,0	-	-	-	-	-	>15,0	-	-	-	-
4/K 2		-	-	-	-	-	8,85	-	-	-	-	-	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5/Q 2		-	>30,0	25,7	23,1	17,5	12,8	-	>15,0	>22,5	18,7	5,25	3,33	-	>15,0	>22,5	>15,0	3,04	-	-	>15,0	>22,5	>15,0	-	-

Tabelle 12: Gewichtsangaben für Thermitversuche

Versuch	Gewicht vor Versuch [kg]	Thermit Einwaage [kg]	$\Sigma$ [kg]	Gewicht nach Versuch [kg]	Differenz [kg]
0/Q 1	170,0	8,0	178,0	176,0	- 2,0
1/B 1	380,5	50,0	430,5	420,0	- 10,5
2/B 2	375,0	100,0	475,0	460,0	- 15,0
3/K 1	361,0	50,0	411,0	403,0	- 8,0
4/K 2	363,0	100,0	463,0	412,0	- 51,0
5/Q 2	358,0	130,0	488,0	457,0	- 31,0

Tabelle 13: Änderungen der Meßlängen

Versuch	Zeitpunkt der Messung	$\Delta a$	$\Delta b$	$\Delta c$
		[%]		
0/Q 1	I II	+) )	+) )	+) )
1/B 1	I II	+ 107 - 112	+) )	+ 160 - 163
2/B 2	I II	+) )	+) )	+) )
3/K 1	I II	+ 29 - 26	+ 14 - 13	+ 16 - 17
4/K 2	I II	+ 23 - 32	+ 22 - 26	+ 26 - 28
5/Q 2	I II	+ 96 - 108	+ 103 - 88	+ 111 - 94
Meßzeitpunkte: I: nach Erwärmung II: nach Abkühlung				
+): Meßmarken bei Versuch unbrauchbar geworden.				



Tabelle 14: Bereiche der geprüften Tiegel (in mm)

Versuch	stark geschädigte Zone	Luftspalt	Zwischenschicht	graue Zone	bunte Zone
O/Q 1	keine Messungen möglich, nur geringe Schädigungen				
1/B 1	15 - 35	3	3	15 - 20	50 - 60
2/B 2	20 - 30	1 - 3	3	20	60 - 70
3/K 1	15	4	2,5	25	60
4/K 2	20	2 - 5	3	20 - 30	70 - 80
5/Q 2	25 - 80	5	6 - 7	25	80 - 100

## Bilder

- 1 DTA von verschiedenen Normalbetonen
- 2 Thermogramme von portlandzementgebundenen Normalbetonen
- 3 Übersicht über die Versuche mit zylinderförmigen Probekörpern
- 4 Versuchsaufbau
- 5 Position der Thermoelemente im Probekörper
- 6 Temperaturverteilung in einem quarzitischen Probekörper
- 7 - 14 Temperaturentwicklung in den zylinderförmigen Probekörpern
- 15 Probekörper für Thermitversuche
- 16 Schallimpulssummen bei den Thermitversuchen
- 17 Schallemissionsaktivitäten bei den Thermitversuchen
- 18 - 28 Temperaturentwicklung in den wannenförmigen Probekörpern
- 29 Gewichtsverluste von Kalkstein-, Quarz- und Basaltbeton
- 30 Risseverteilung im Betontiegel
- 31 Meßstrecken für Setzdehnungsmesser
- 32 Thermische Dehnungen der Thermitbetone
- 33 Gesägter Thermittiegel
- 34 Schematische Darstellung der Tiegelquerschnitte
- 35 DTA geschädigter Betonzonen
- 36 Röntgenbeugungsdiagramme geschädigter Betonzonen
- 37 DTA der Zwischenschichten
- 38 p-t-Diagramm des Einstoffsystems  $\text{SiO}_2$

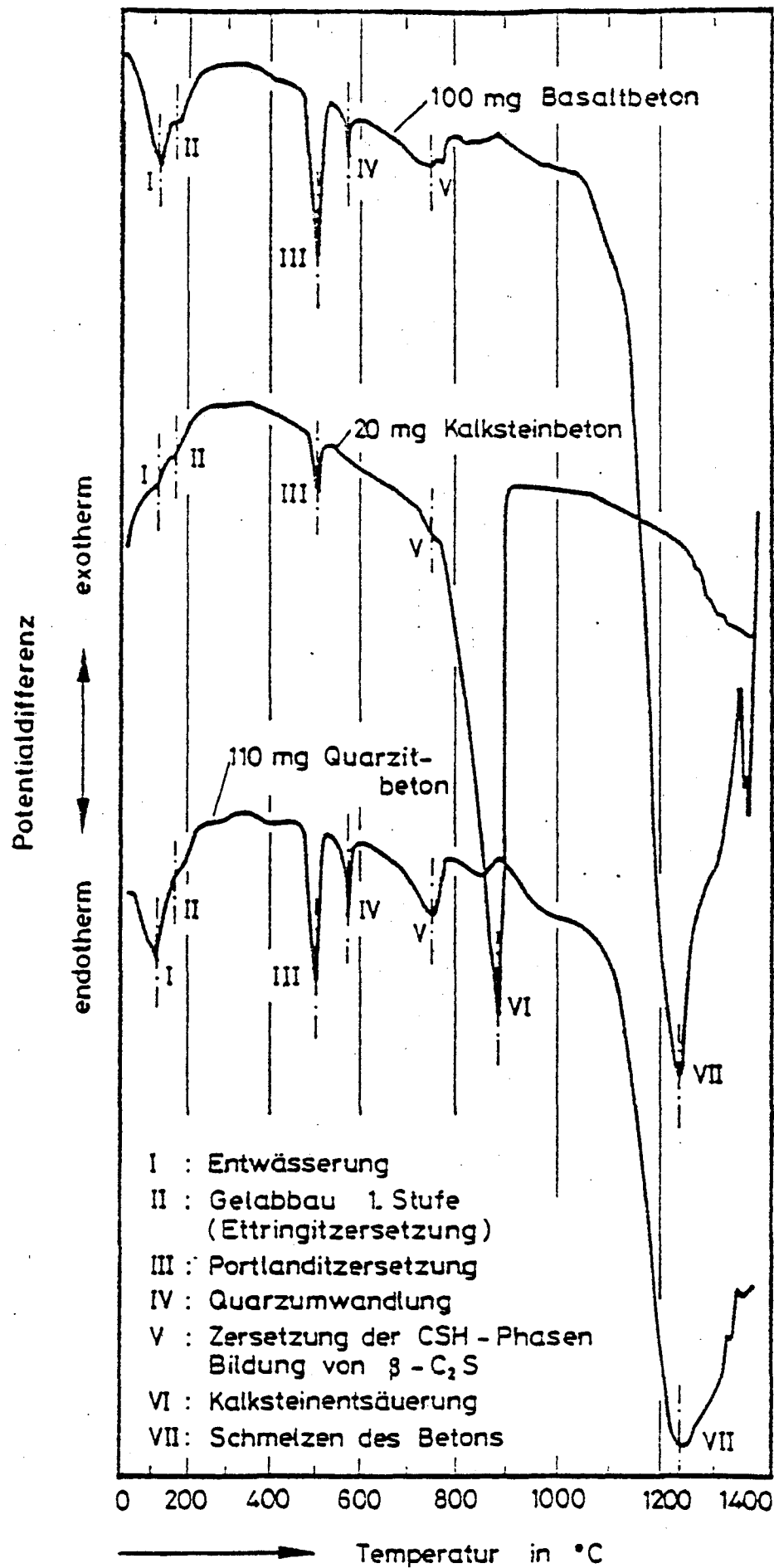
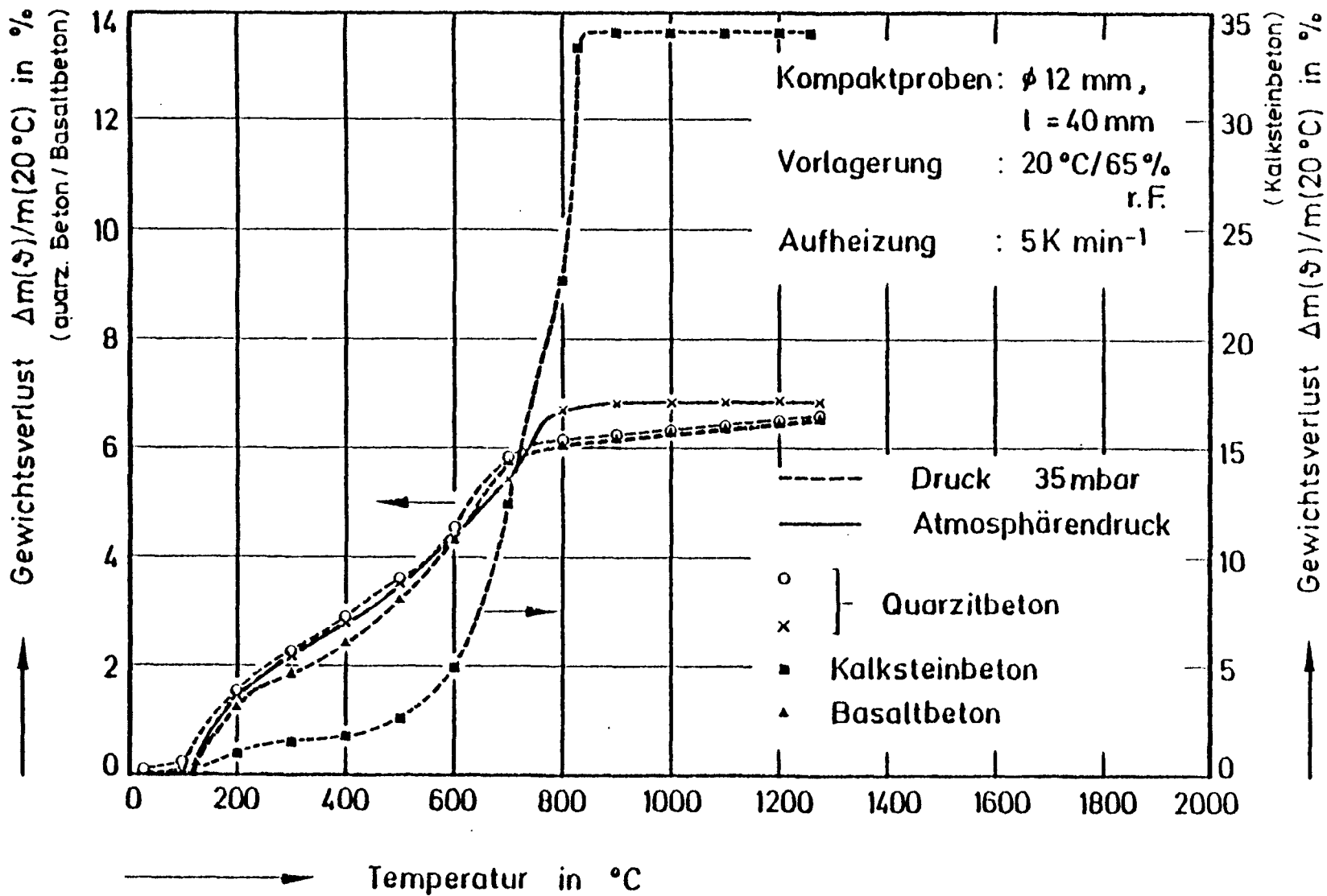
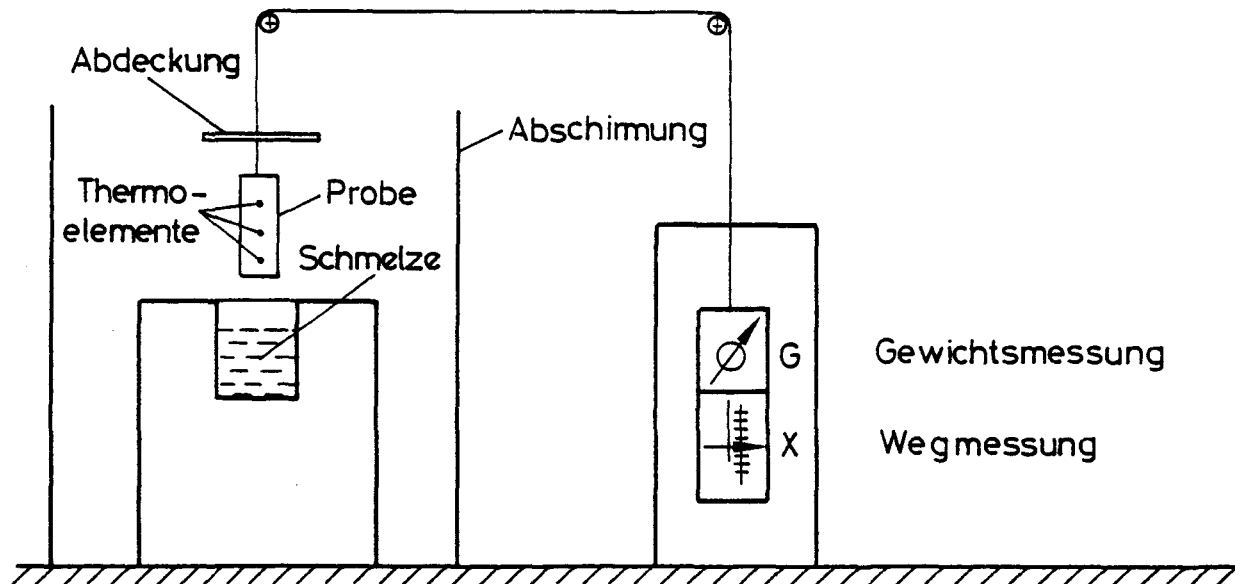


Bild 1: DTA von verschiedenen Normalbetonen

Bild 2: Thermogramme von portlandzementgebundenen Normalbetonen



## Versuchsaufbau



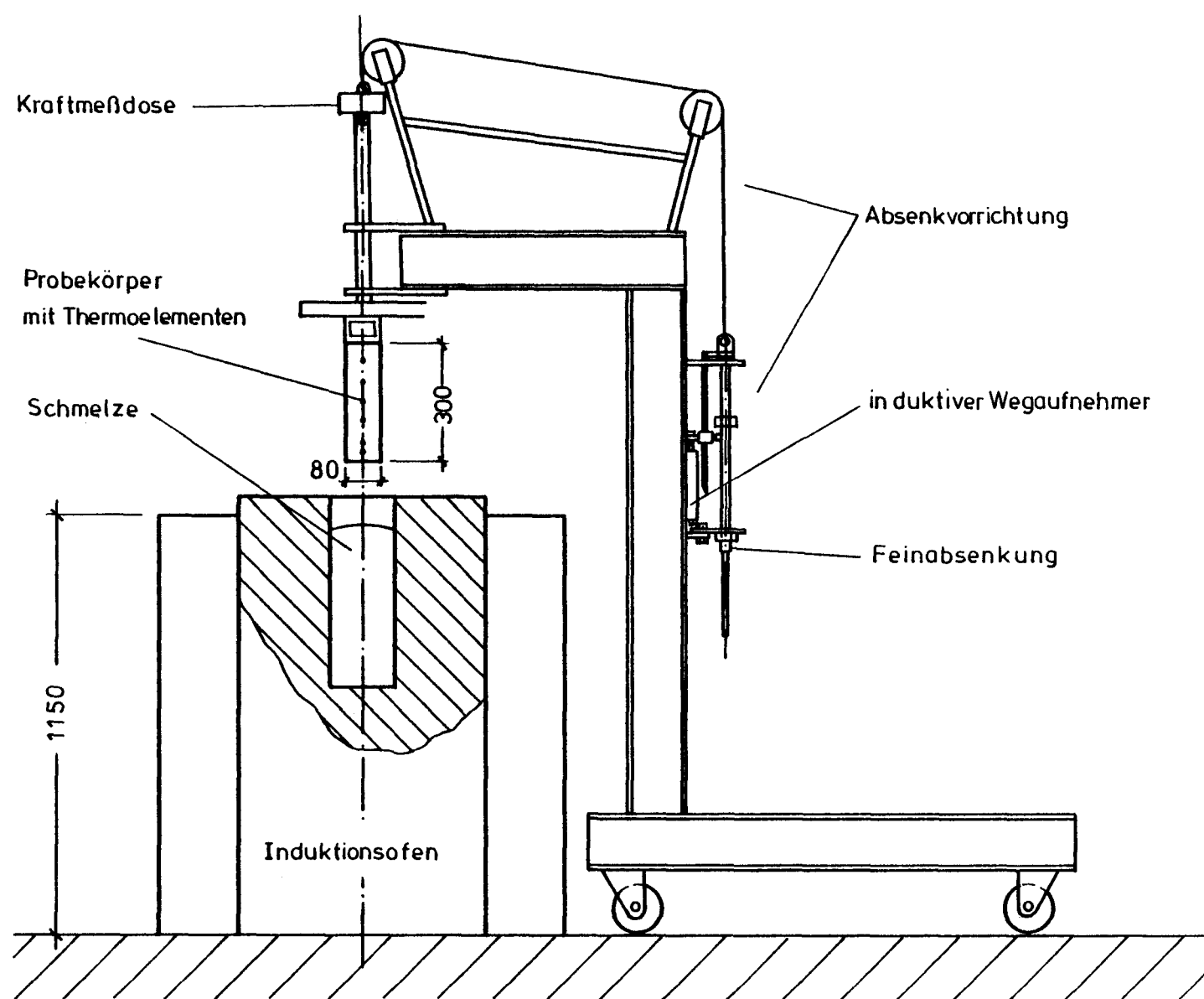
## Versuchsprogramm

A	B
Annäherung von Beton an die Schmelze	Eintauchen von Beton in die Schmelze
Versuche mit Betonen, die sich in Zusammensetzung und Lagerung unterscheiden	

## Meßprogramm

A	B
Temperaturen $T_i$	Temperaturen $T_i$
Kraft $G$	Kraft $G$
Weg $X$	Eintauchtiefe $X$
Belastungszeit $t$	Eintauchzeit $t$

Bild 3 : Übersicht über die Versuche mit  
zylinderförmigen Probekörpern



**Bild 4 : Versuchsaufbau**

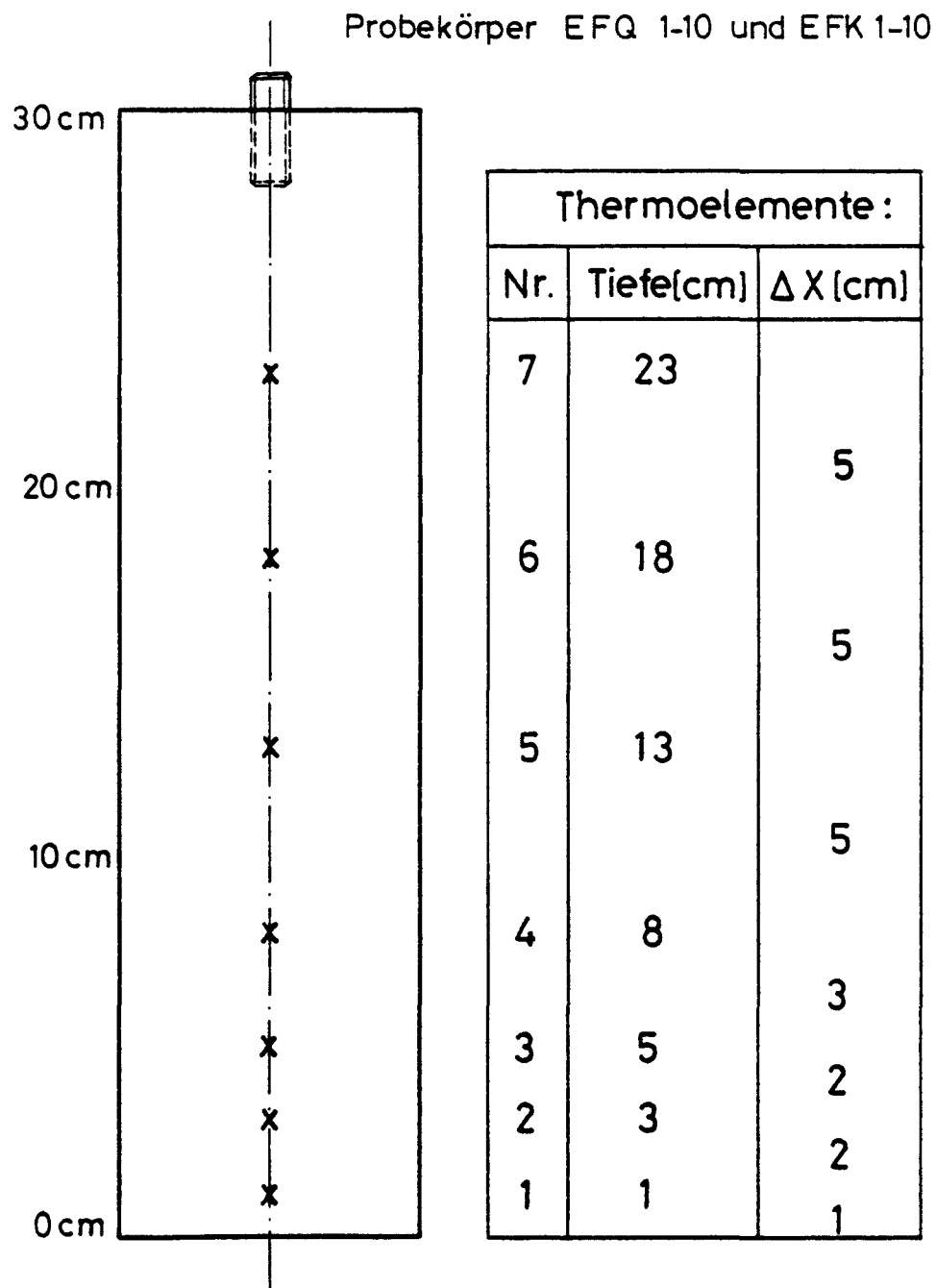


Bild 5 : Position der Thermoelemente im Probekörper

Bild 6: Temperaturverteilung  
in einem quarz. Probekörper

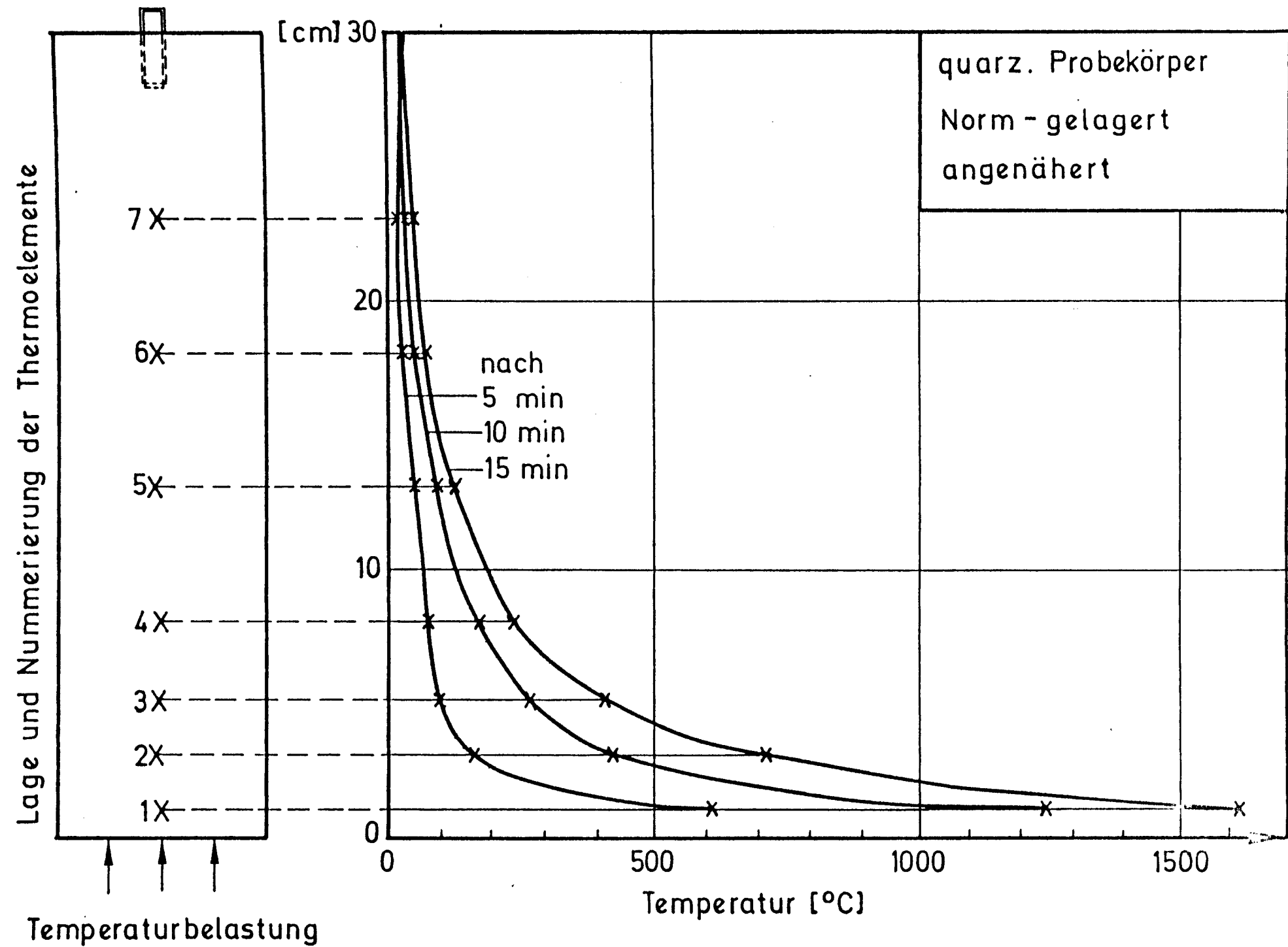




Bild 7: Temperaturentwicklung im zyl. Probekörper

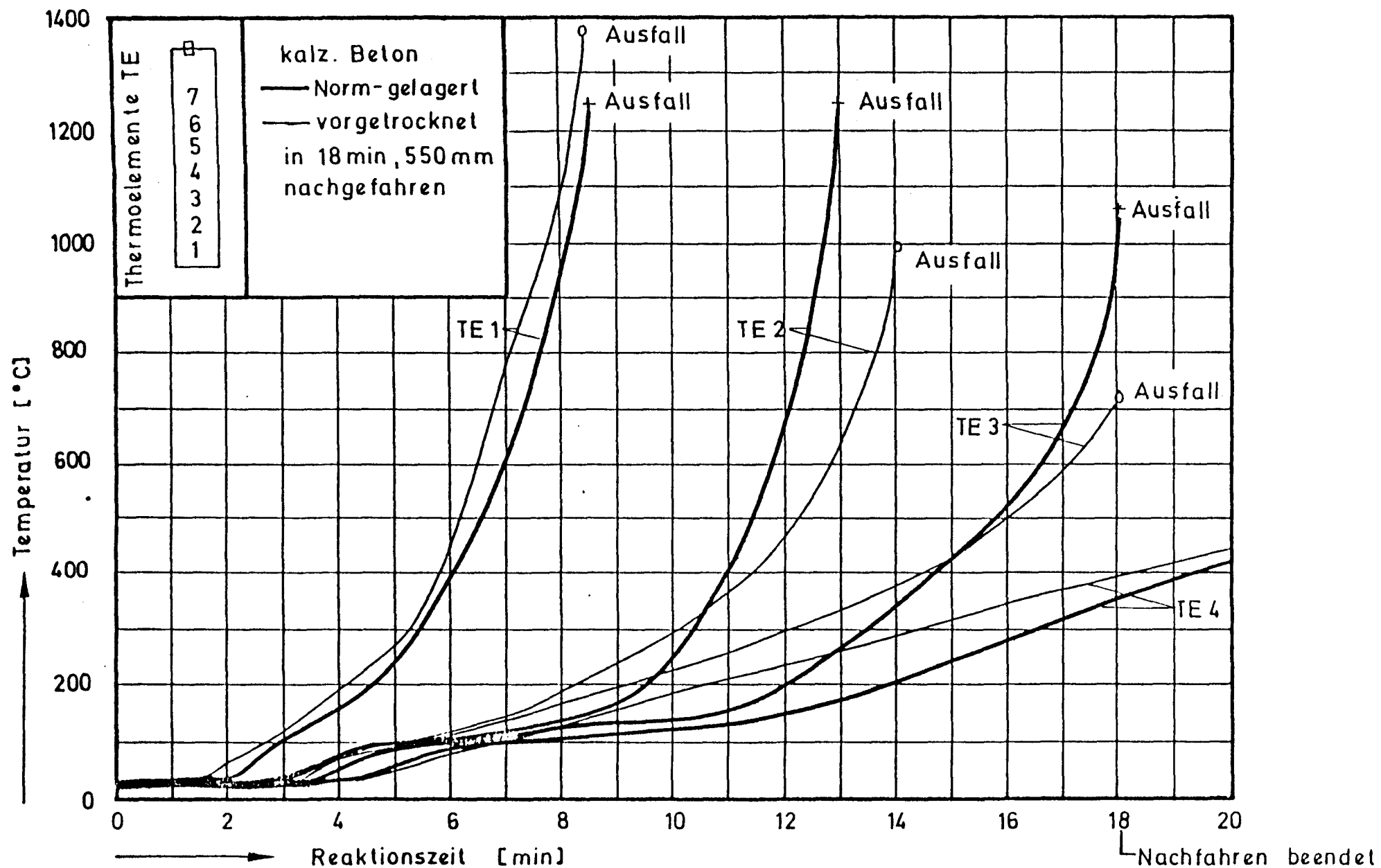


Bild 8: Temperaturentwicklung im zyl. Probekörper

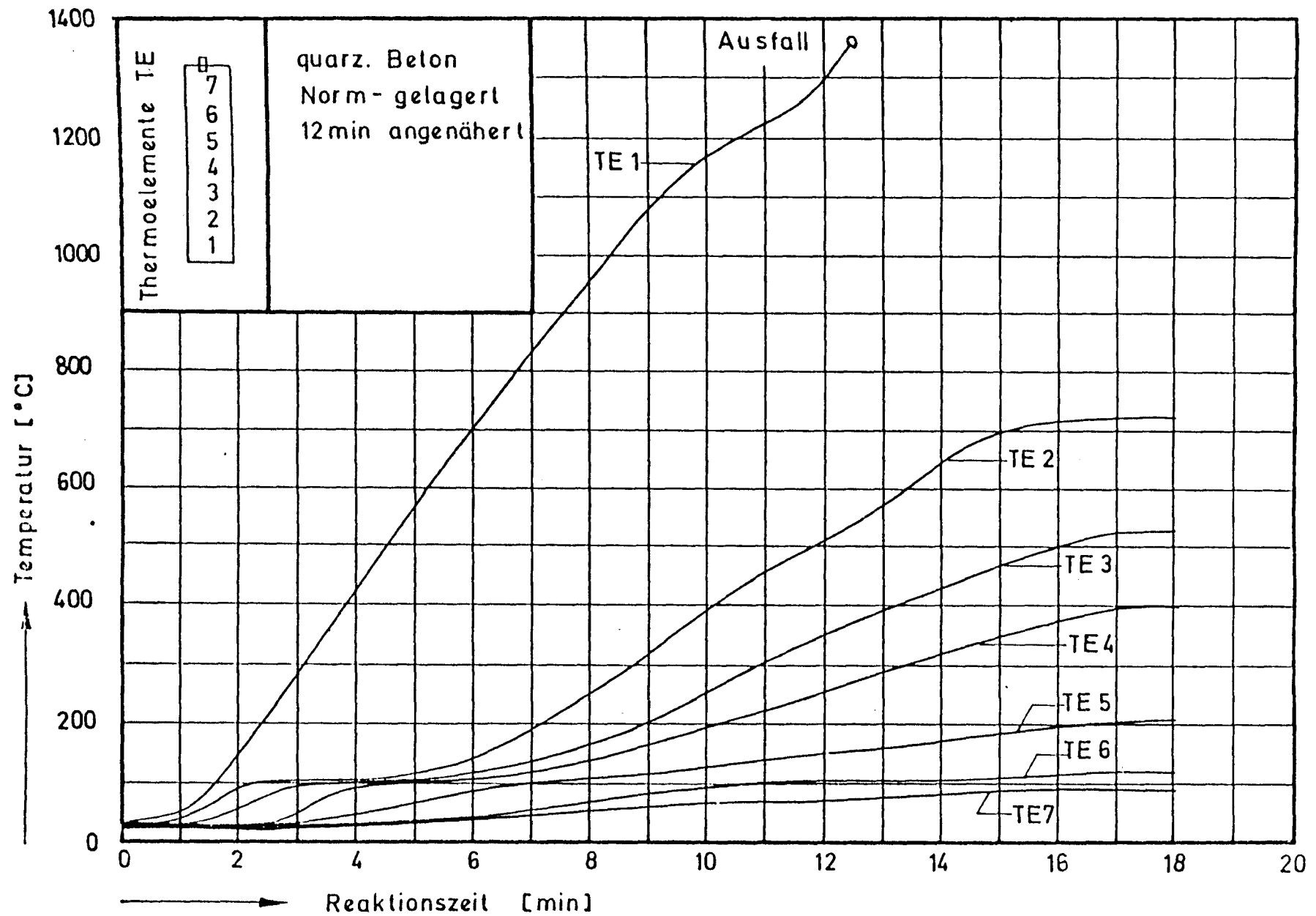


Bild 9: Temperaturentwicklung im zyl. Probekörper

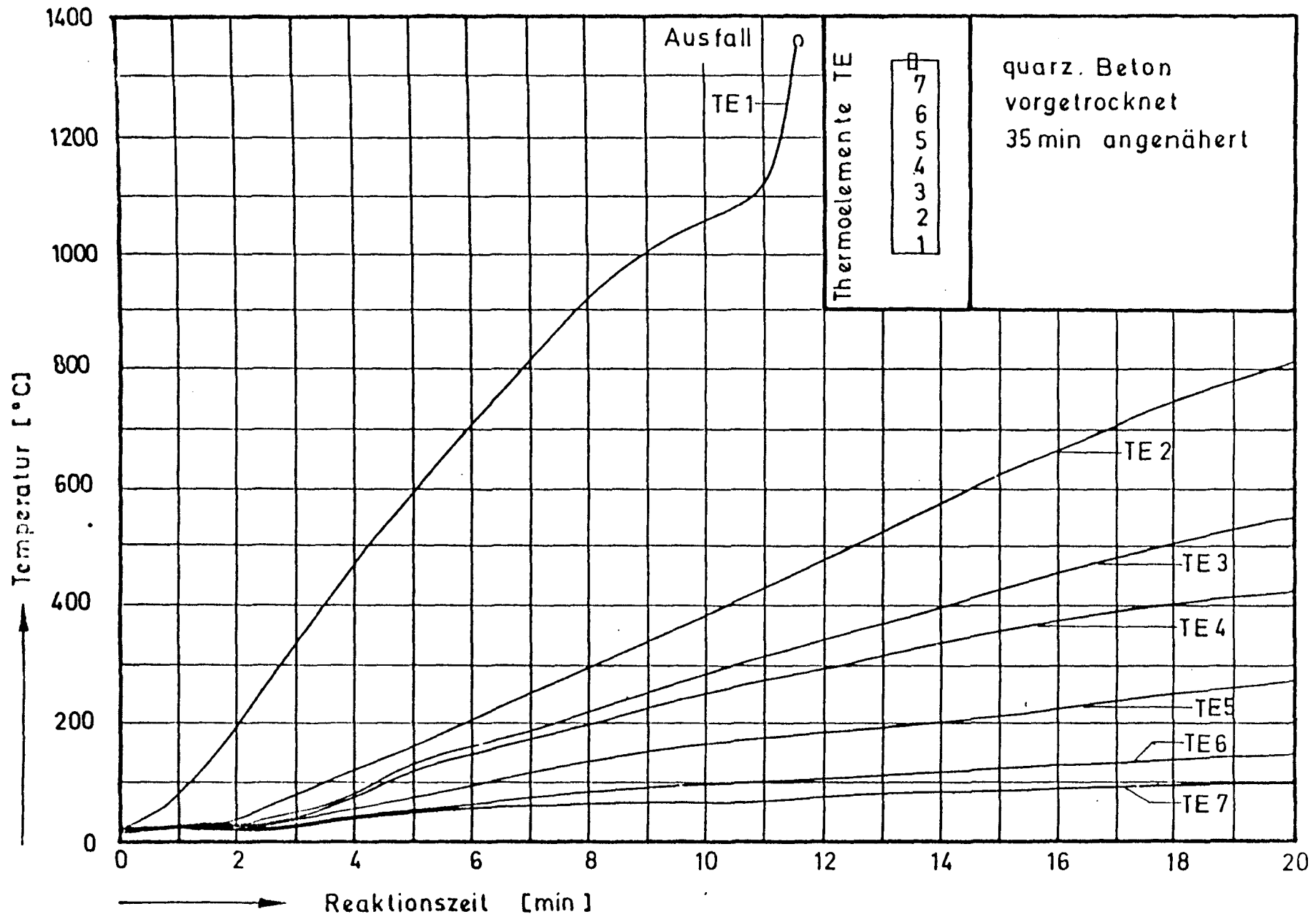


Bild 10: Temperaturentwicklung im zyl. Probekörper

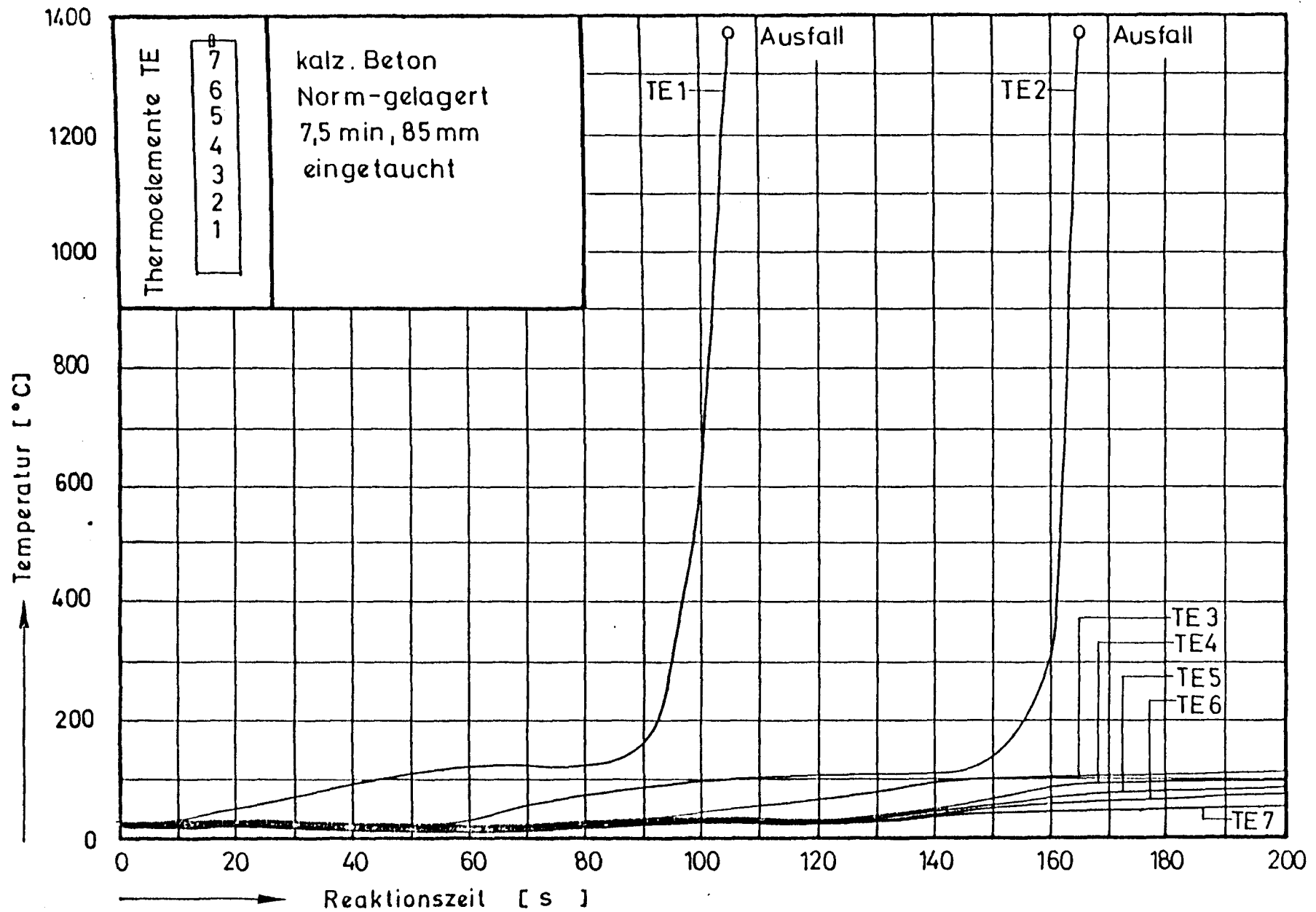


Bild 11: Temperaturentwicklung im zyl. Probekörper

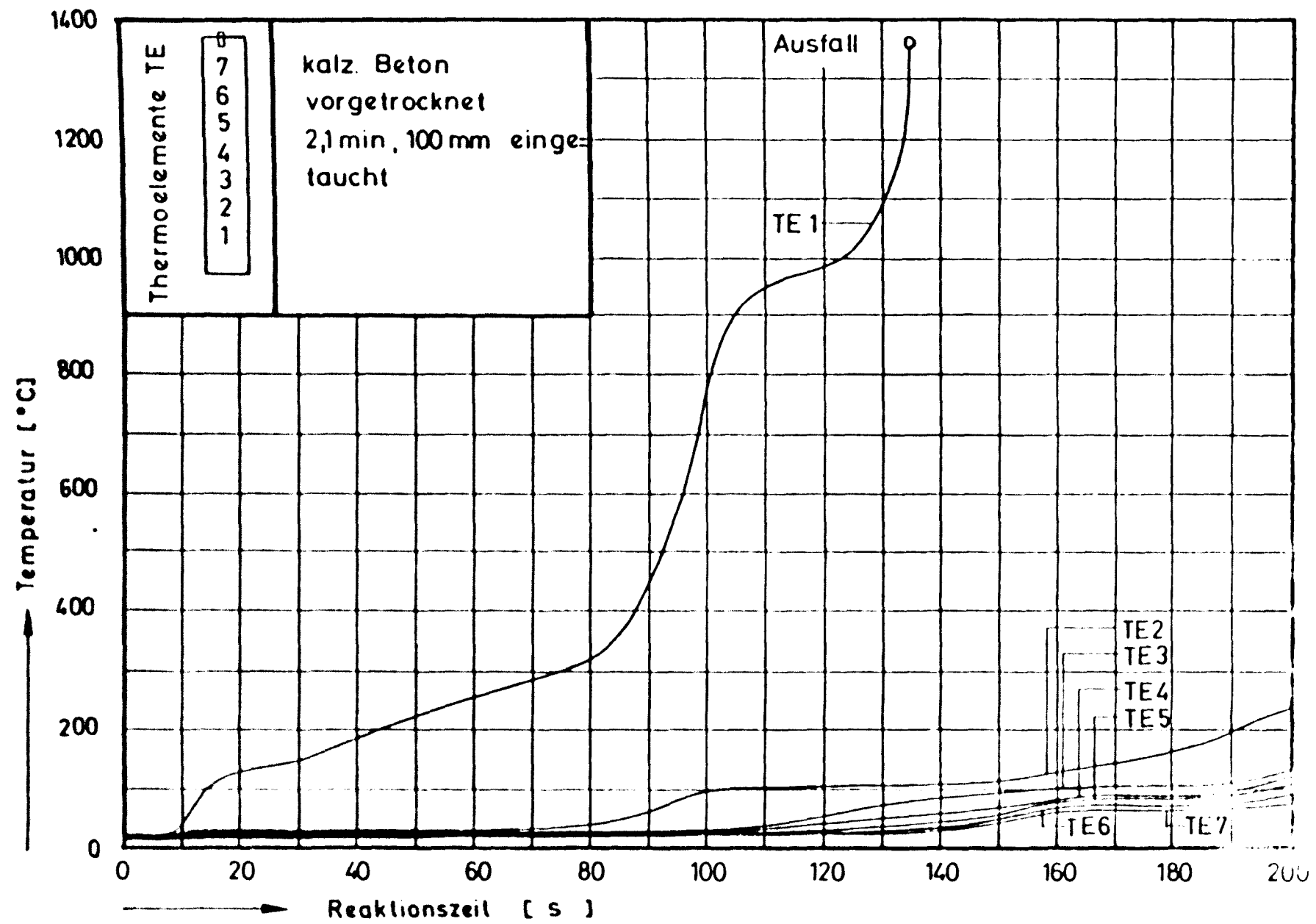


Bild 12: Temperaturentwicklung im zyl. Probekörper

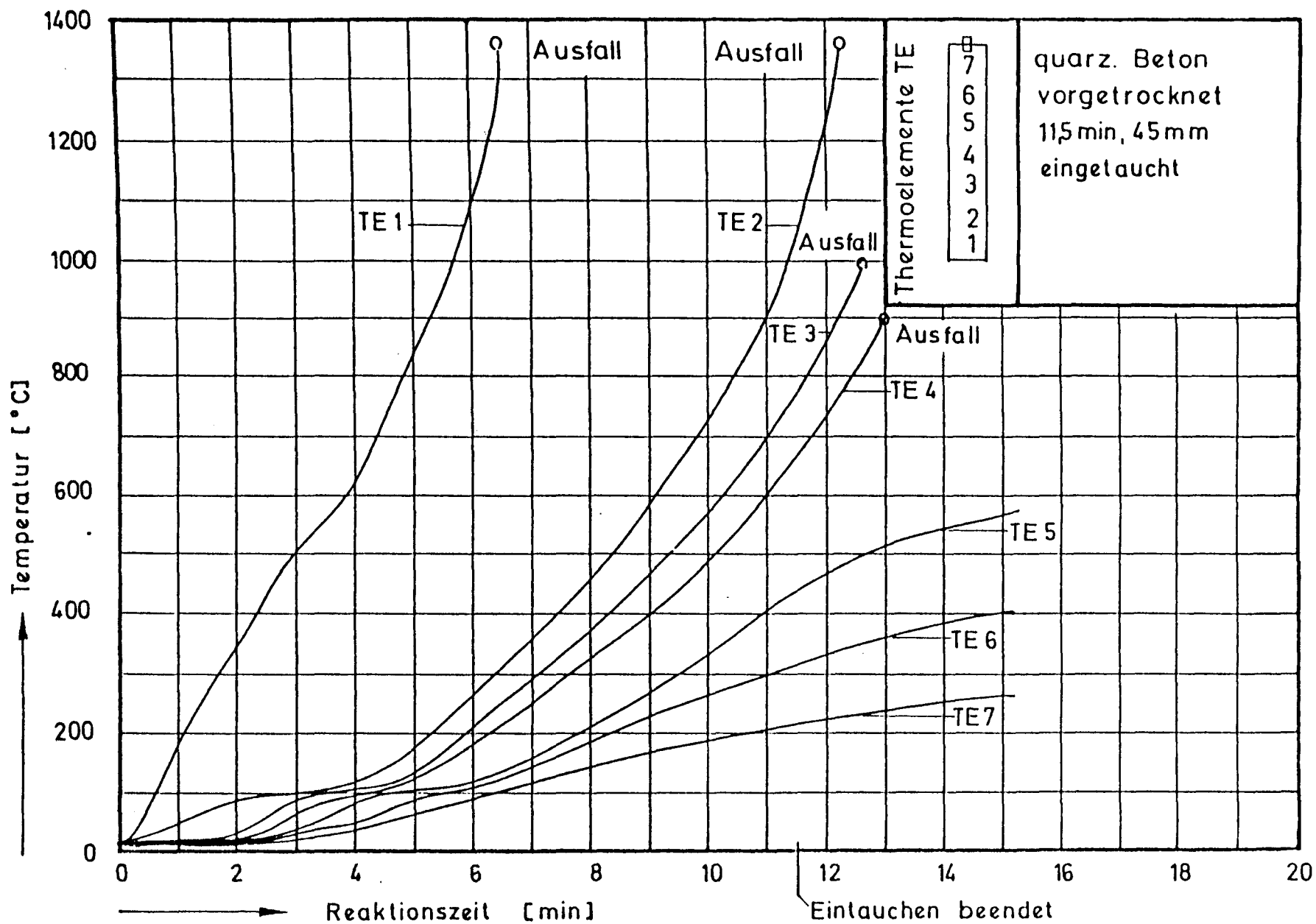


Bild 13: Temperaturentwicklung im zyl. Probekörper

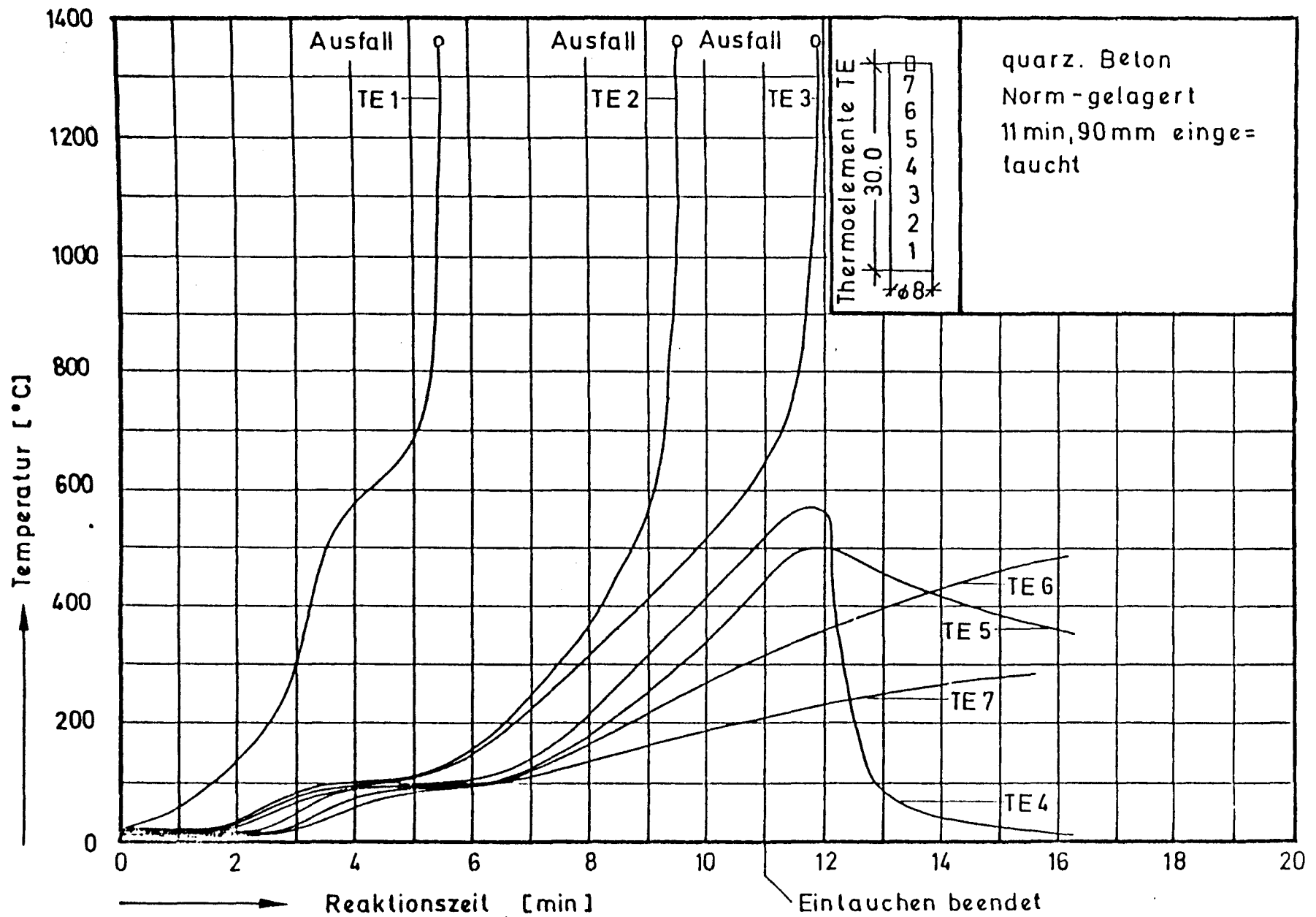
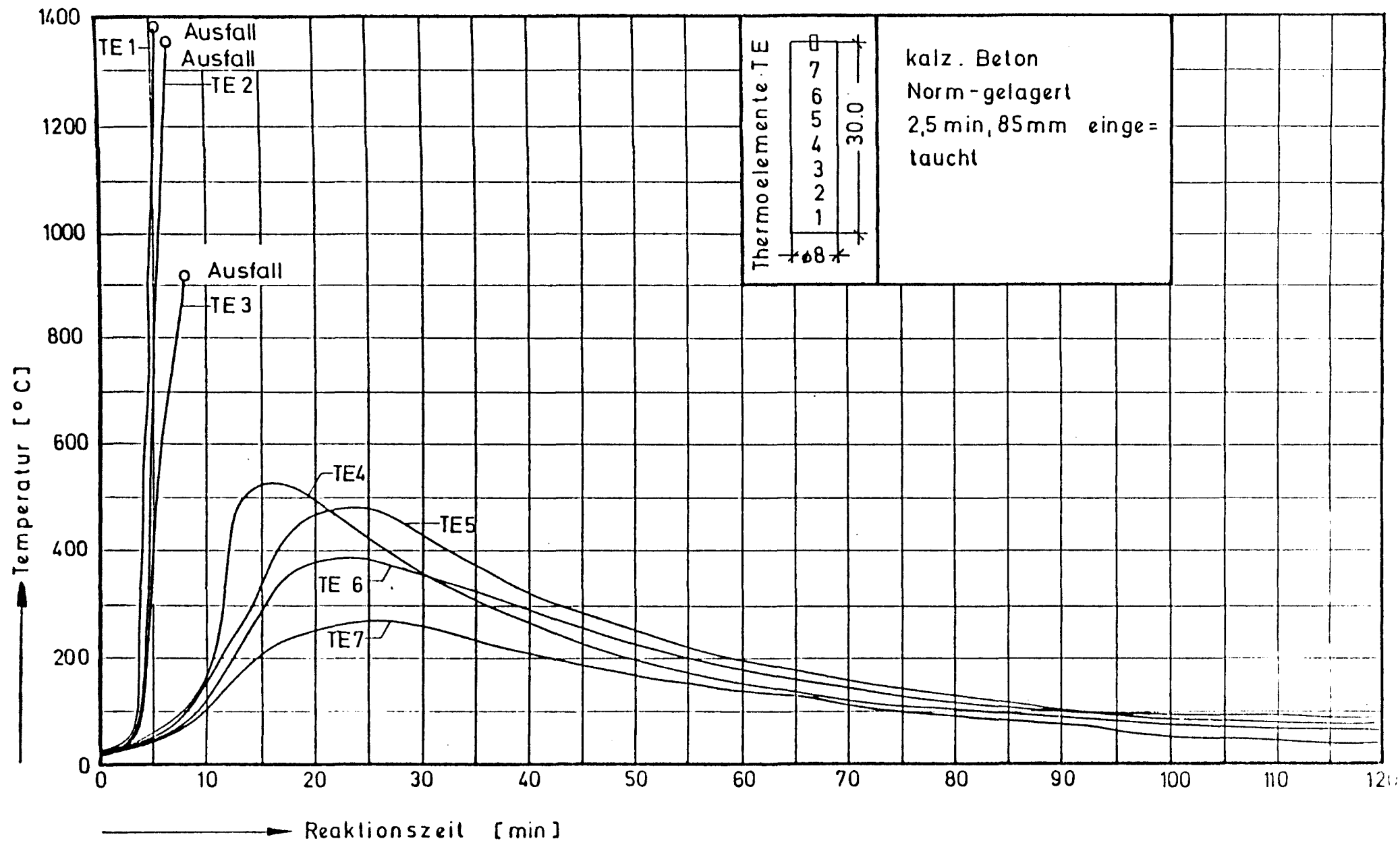
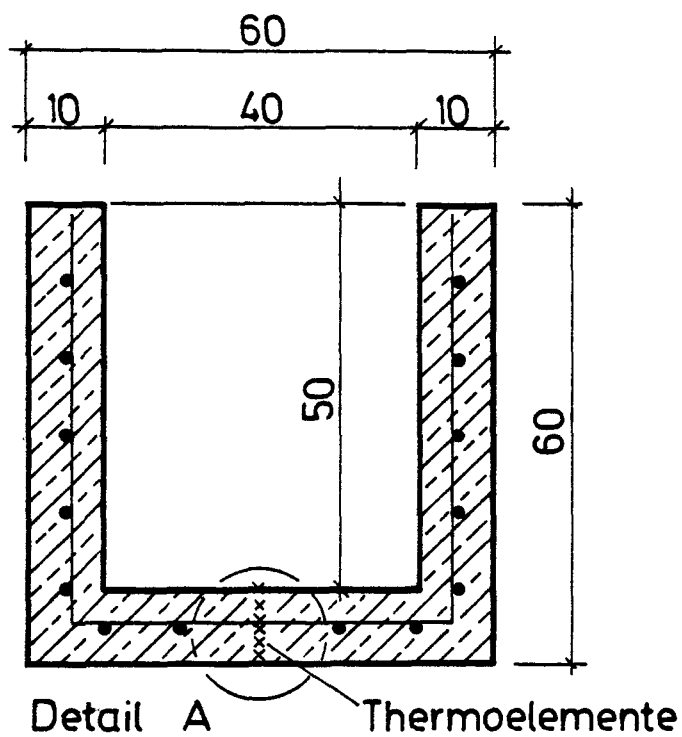


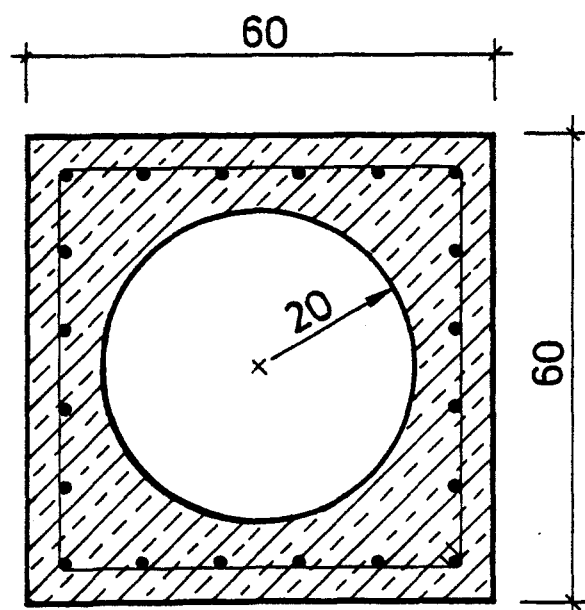
Bild 14: Temperaturentwicklung im zyl. Probekörper



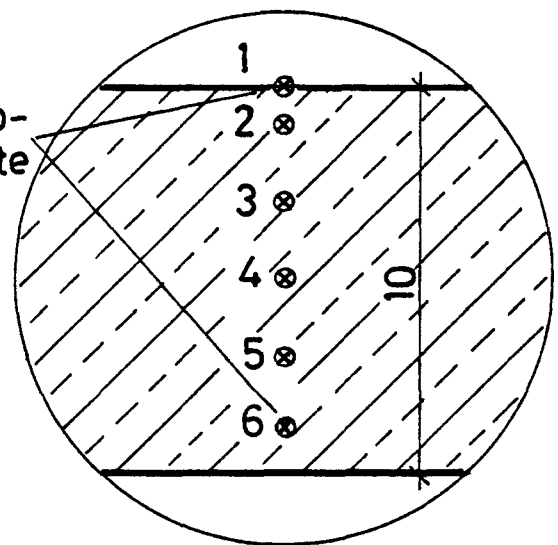




Schnitt senkrecht



Thermoelemente



Detail A

Bewehrung:

Betonstahlmatte  $\phi$  6 III/15

Schnitt waagrecht

Bild 15: Probekörper für Themitversuche

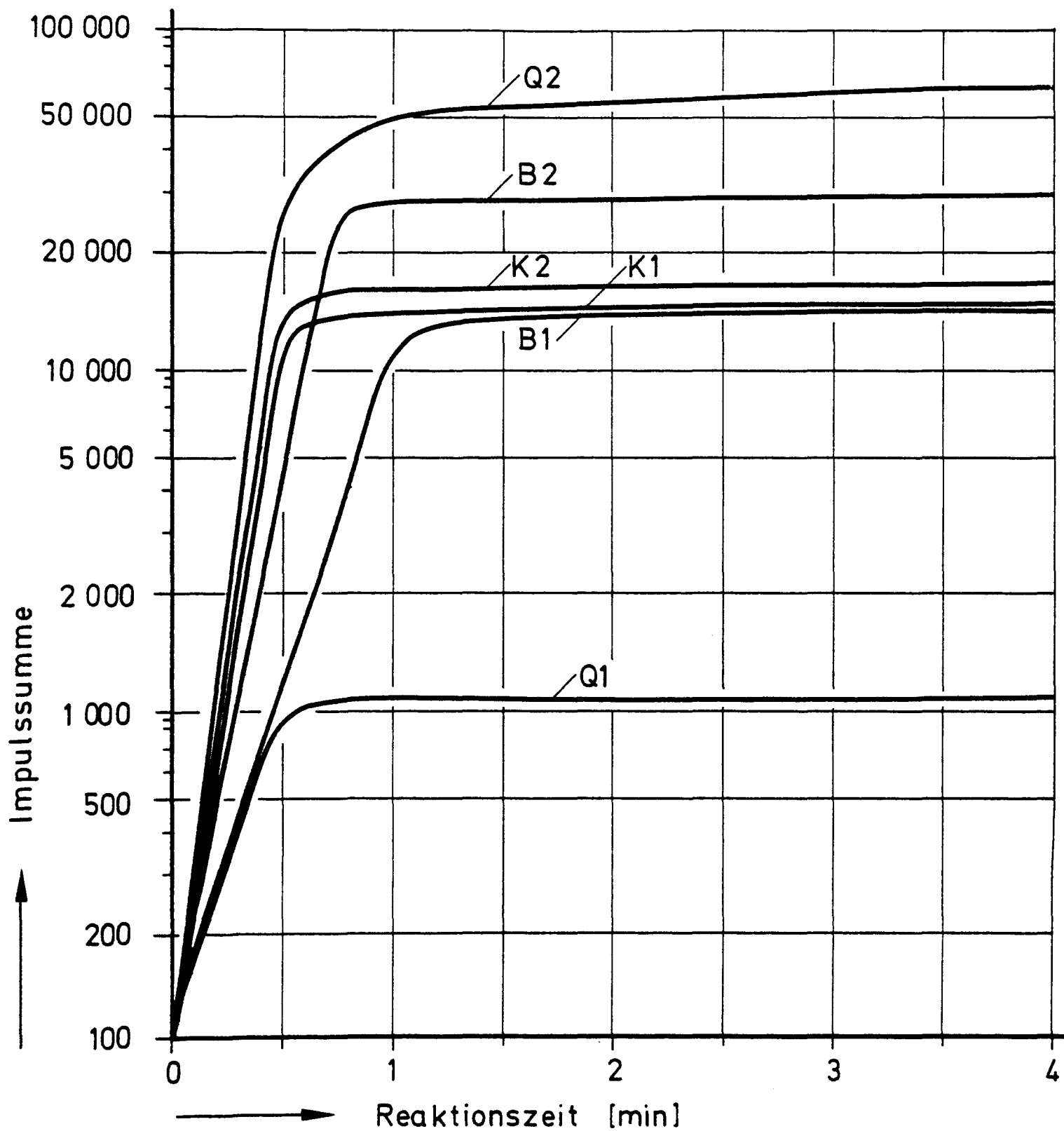


Bild 16: Schallimpulssummen

Bild 17: Schallemissionsaktivitäten

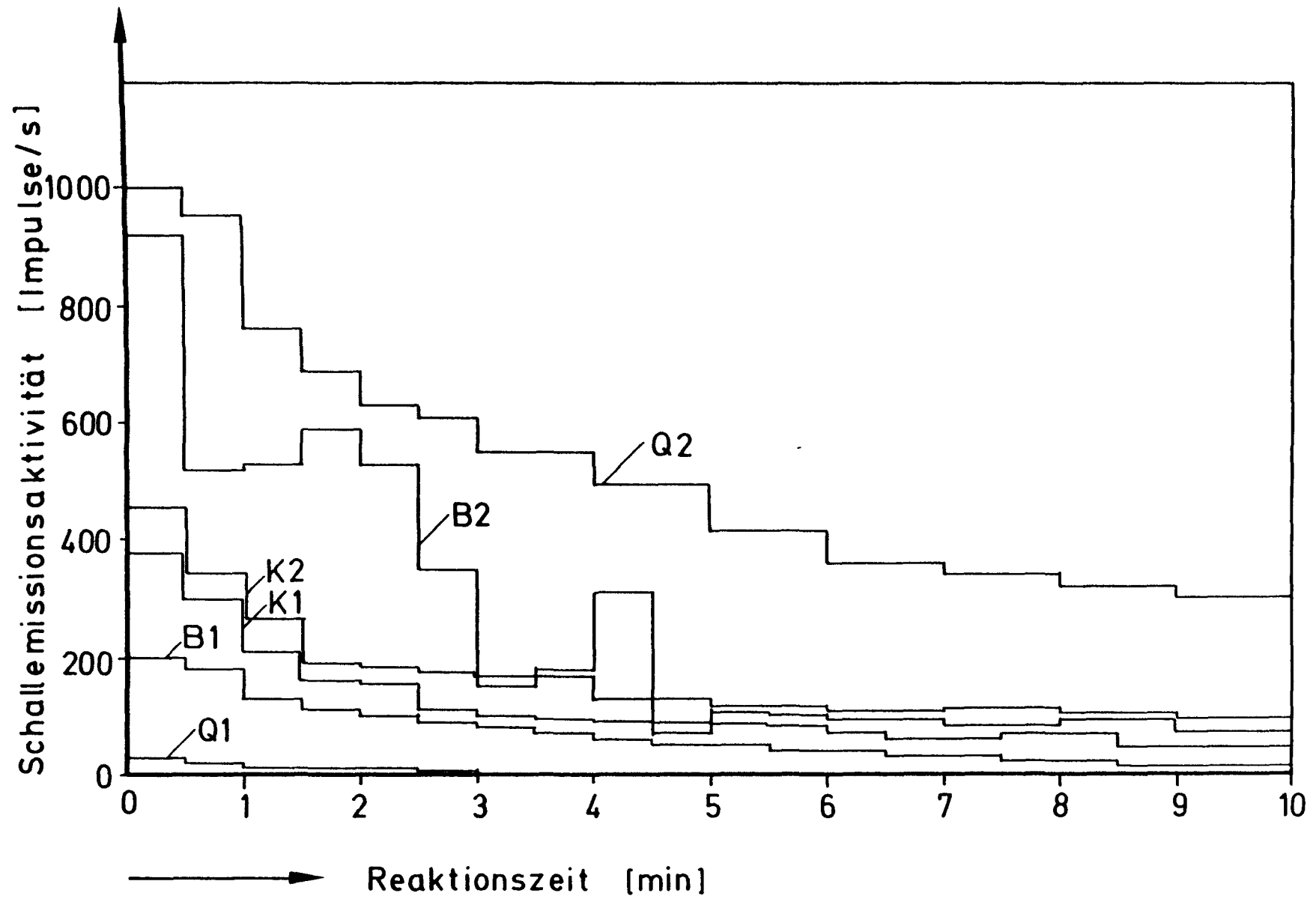


Bild 18: Temperaturentwicklung im Beton :  
Versuch Q 1

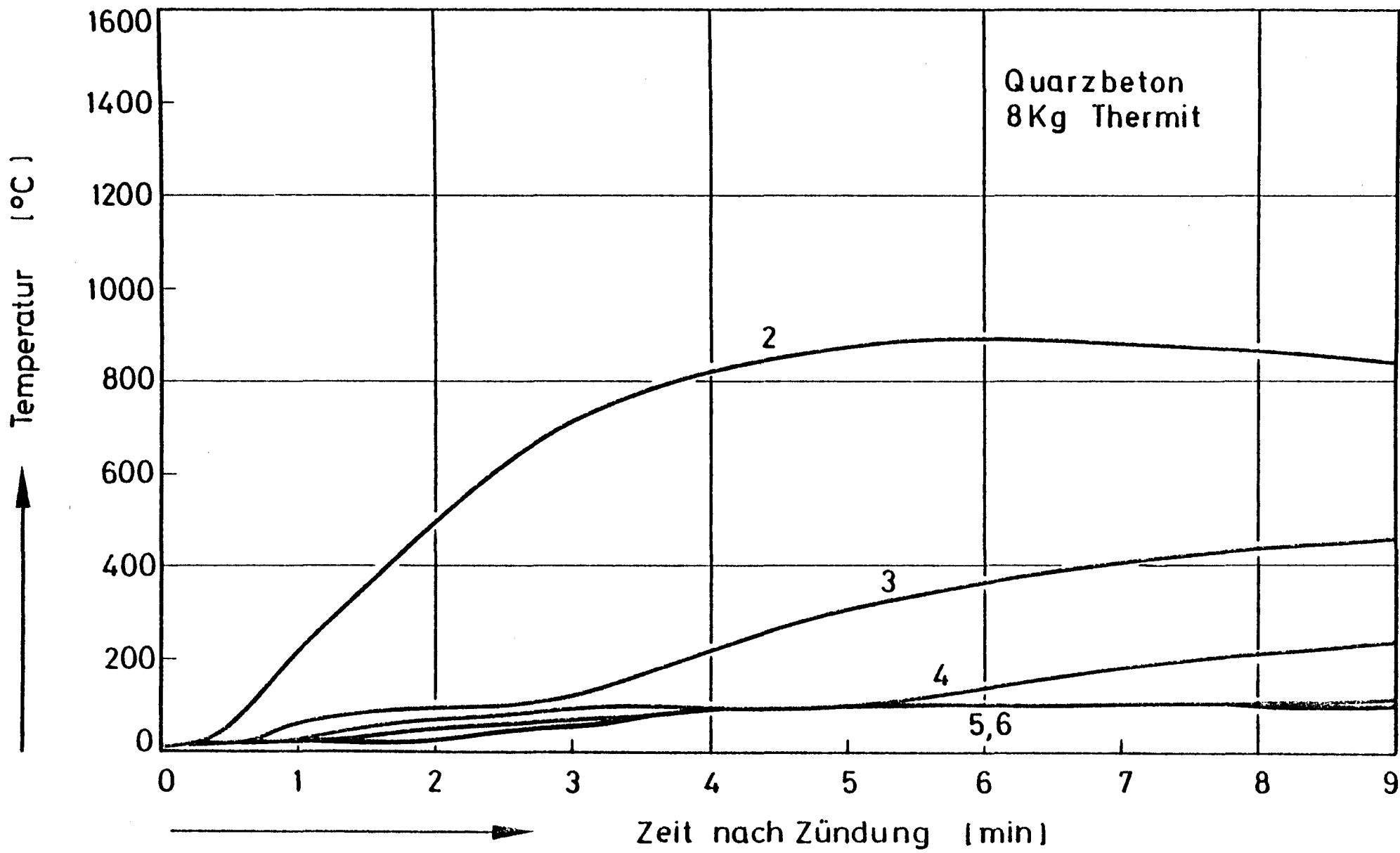


Bild 19: Temperaturentwicklung im Beton :  
Versuch B 1

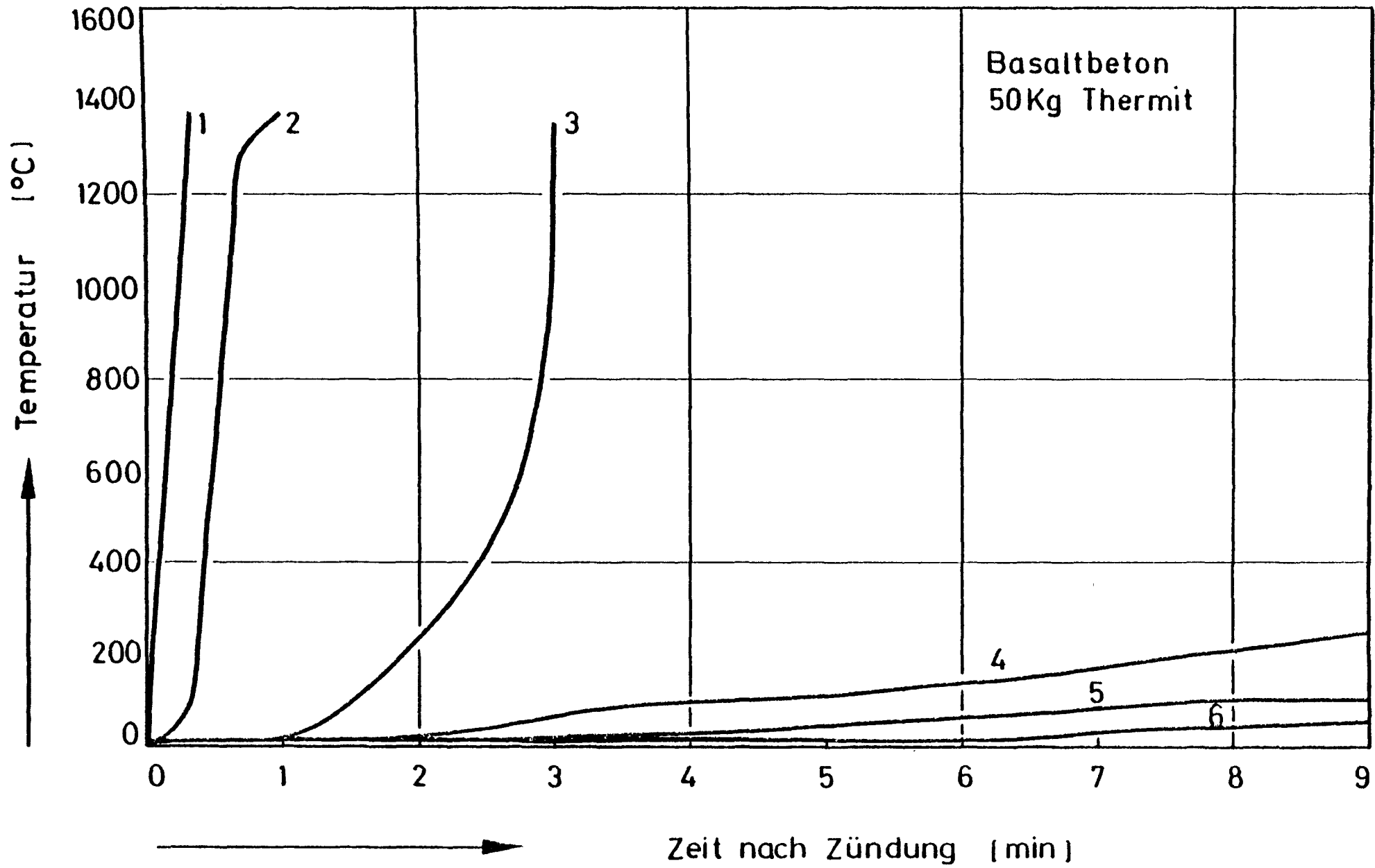


Bild 20: Temperaturentwicklung im Beton :  
Versuch B 2

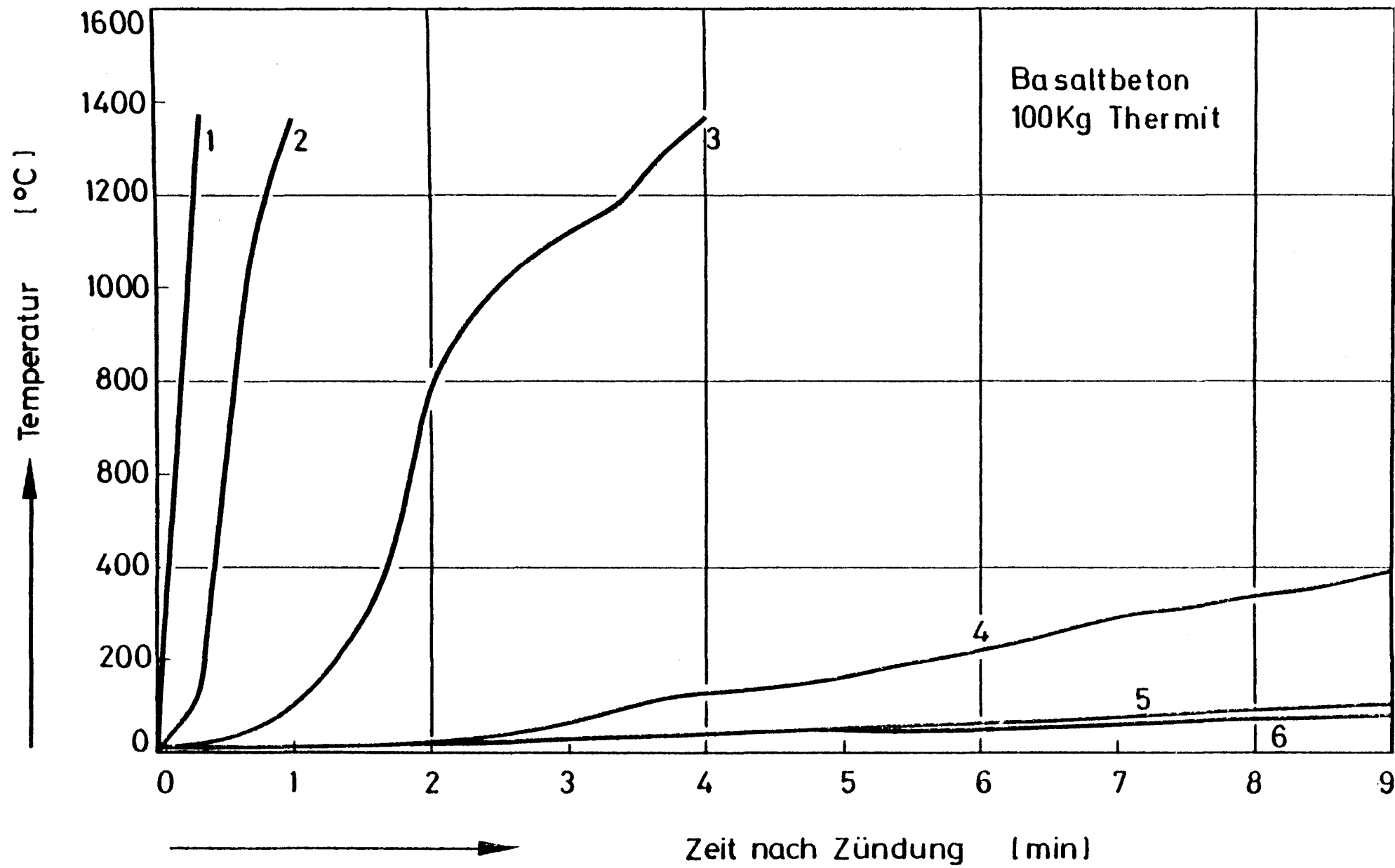


Bild 21: Temperaturentwicklung im Beton :

Versuch K 1

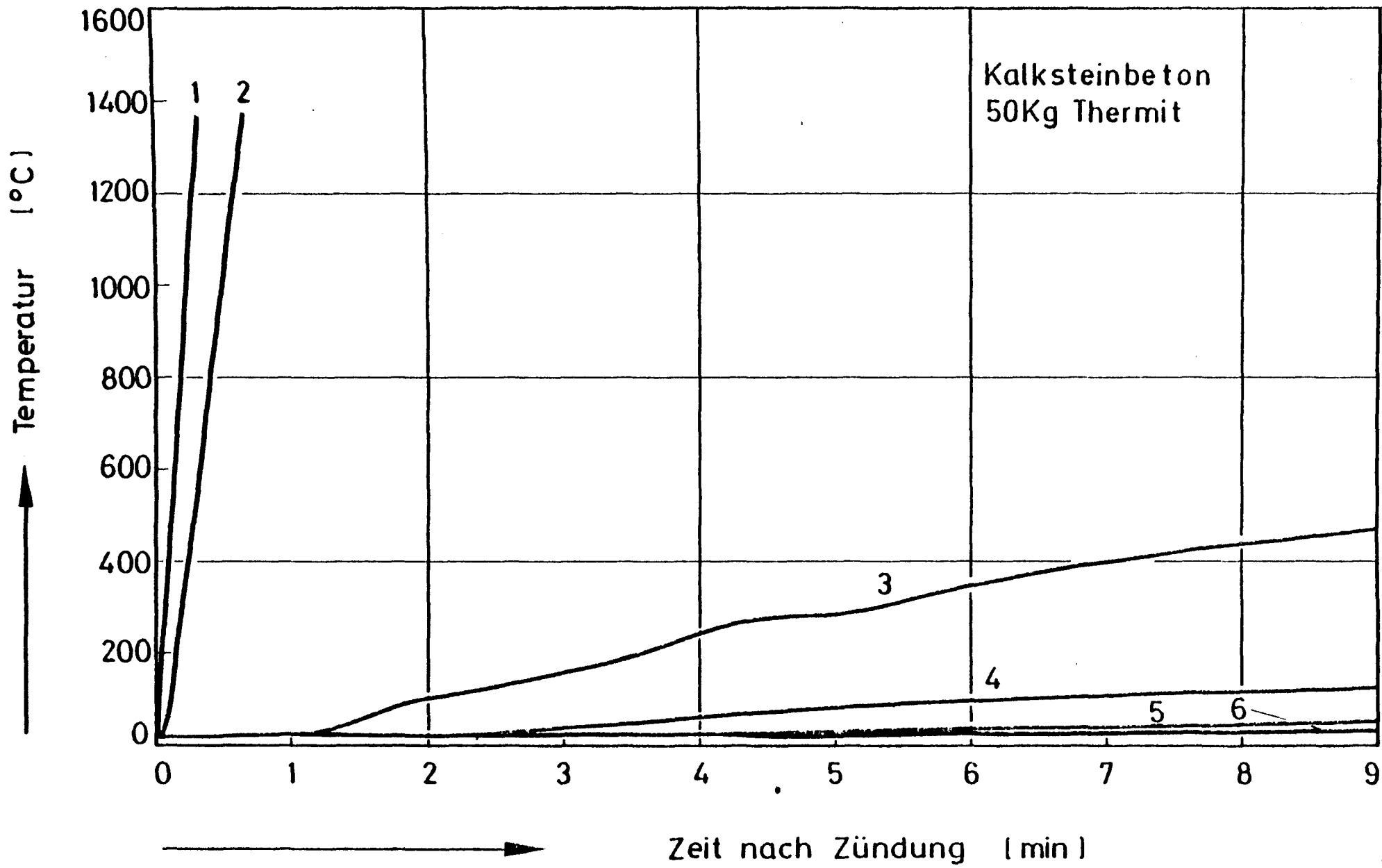


Bild 22: Temperaturentwicklung im Beton :  
Versuch Q2

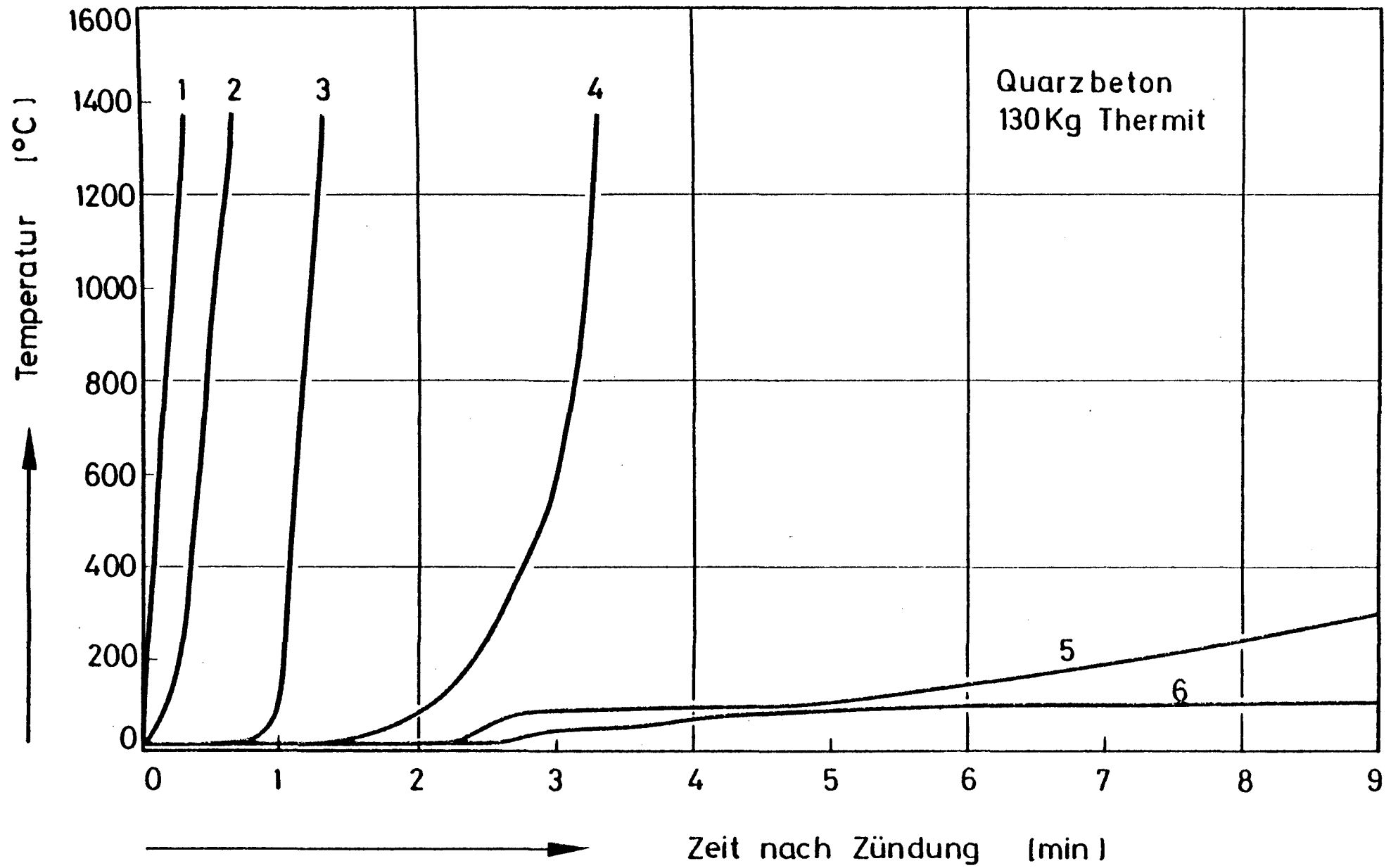




Bild 23: Temperaturentwicklung im Beton :  
Versuch Q1

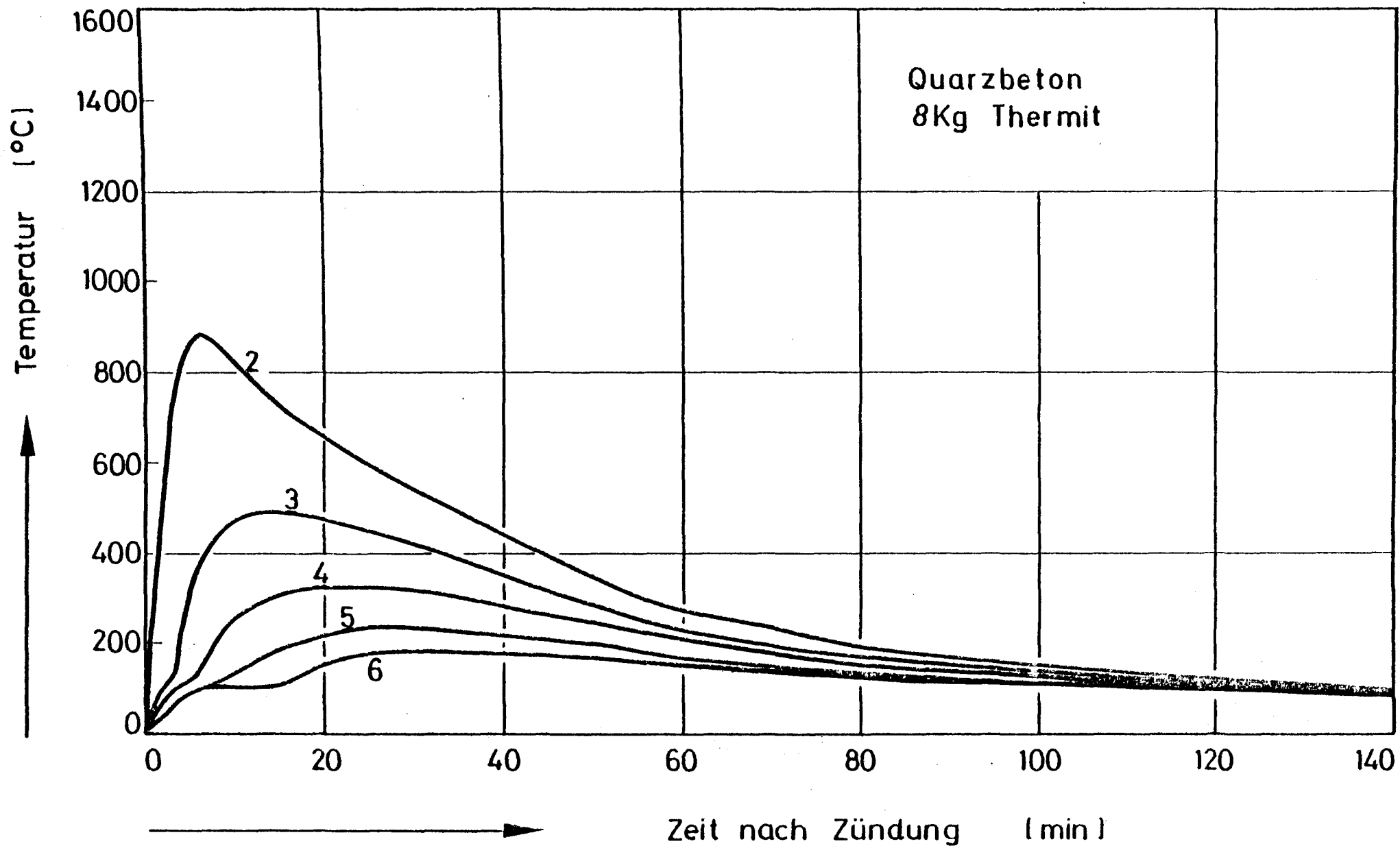


Bild 24: Temperaturentwicklung im Beton :  
Versuch B1

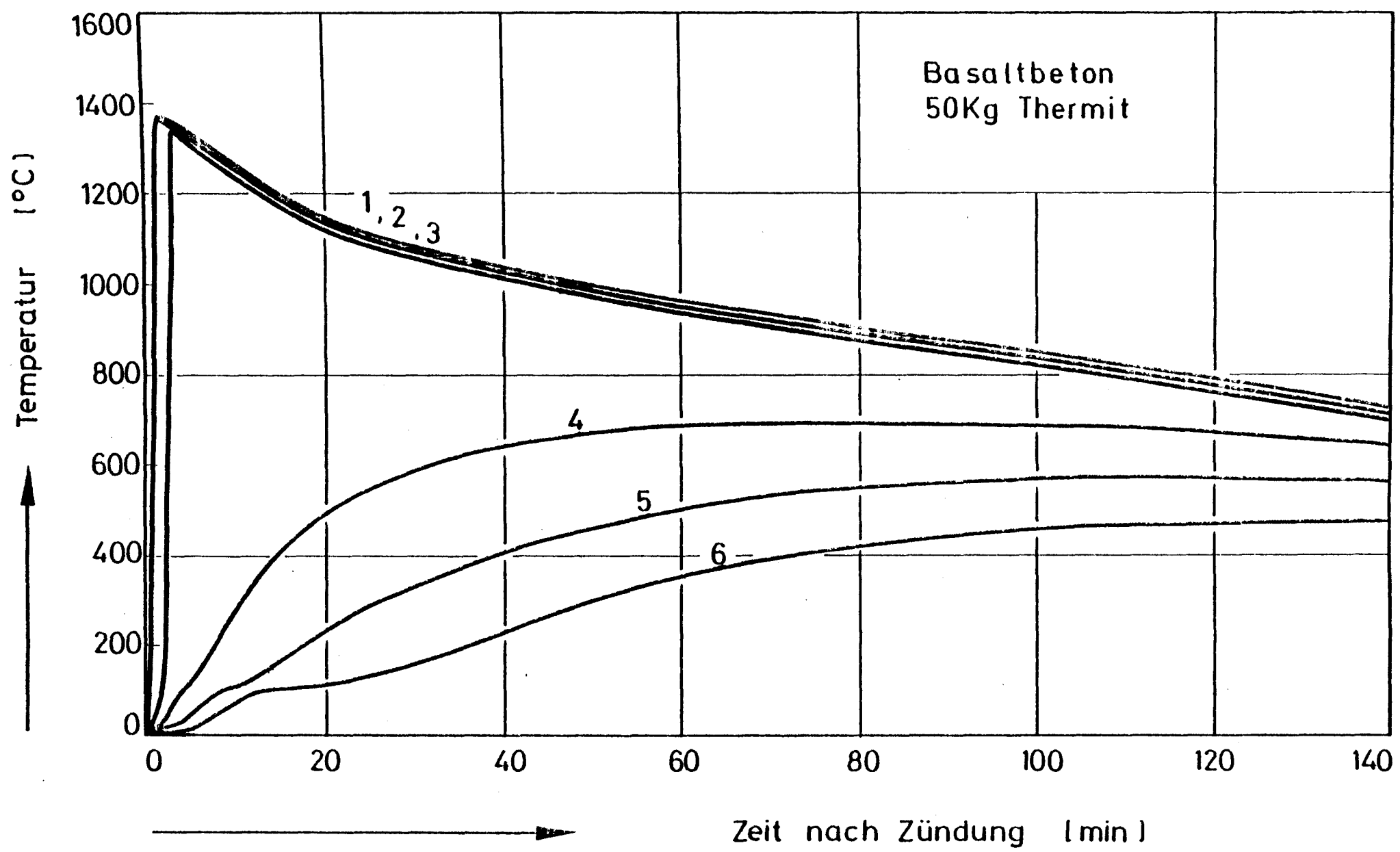


Bild 25: Temperaturentwicklung im Beton :  
Versuch B2

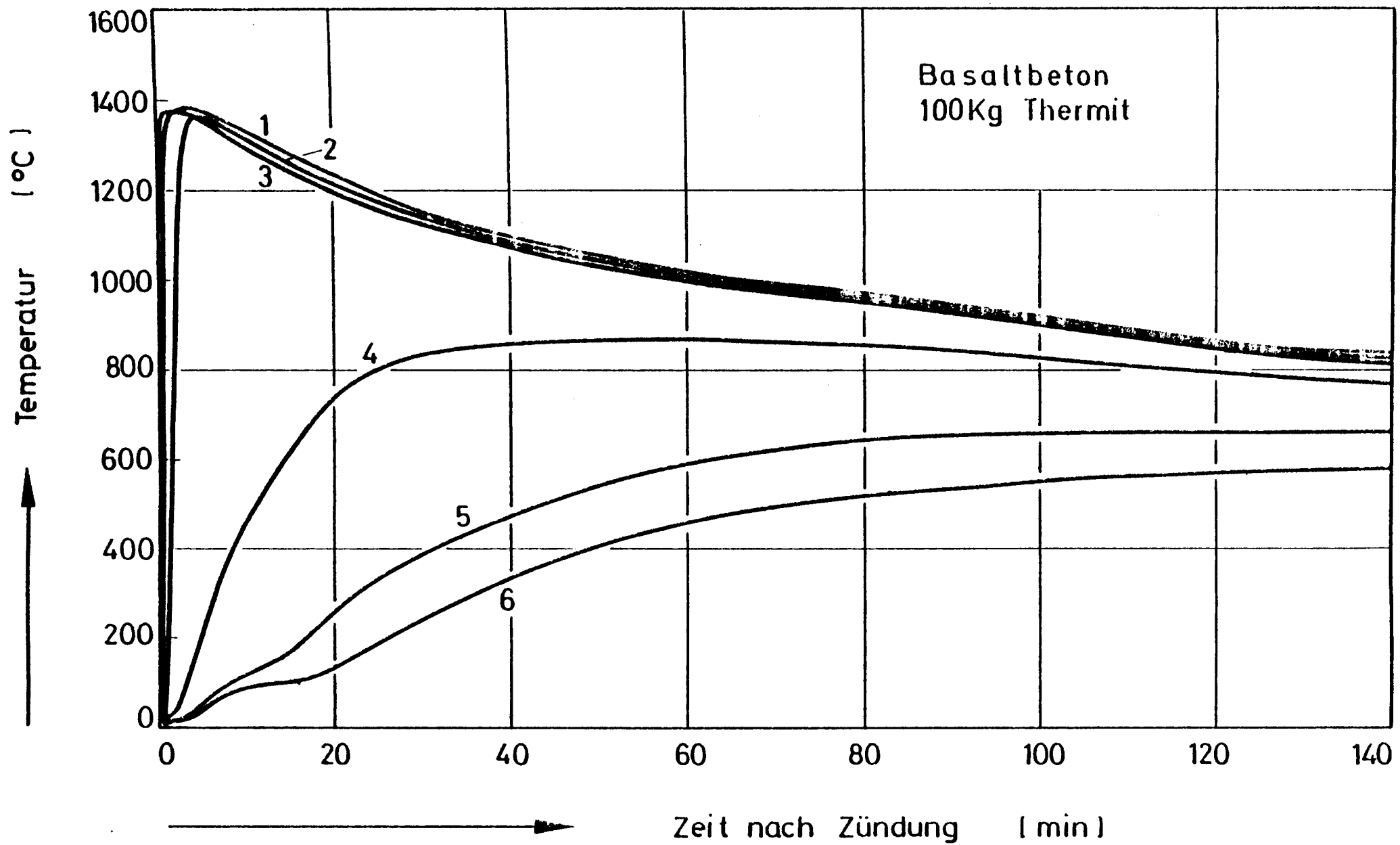


Bild 26: Temperaturentwicklung im Beton :  
Versuch K1

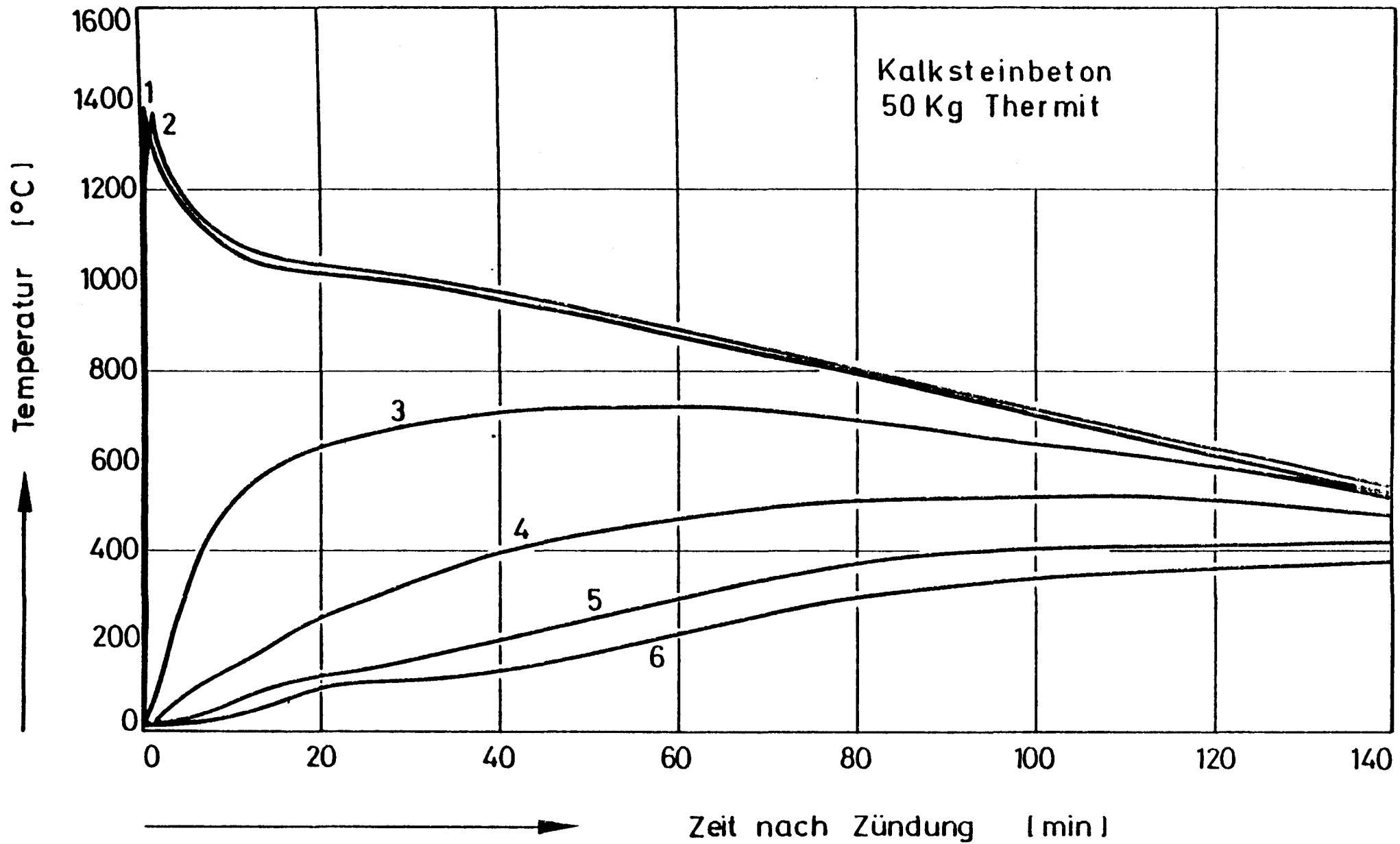


Bild 27: Temperaturentwicklung im Beton :  
Versuch K2

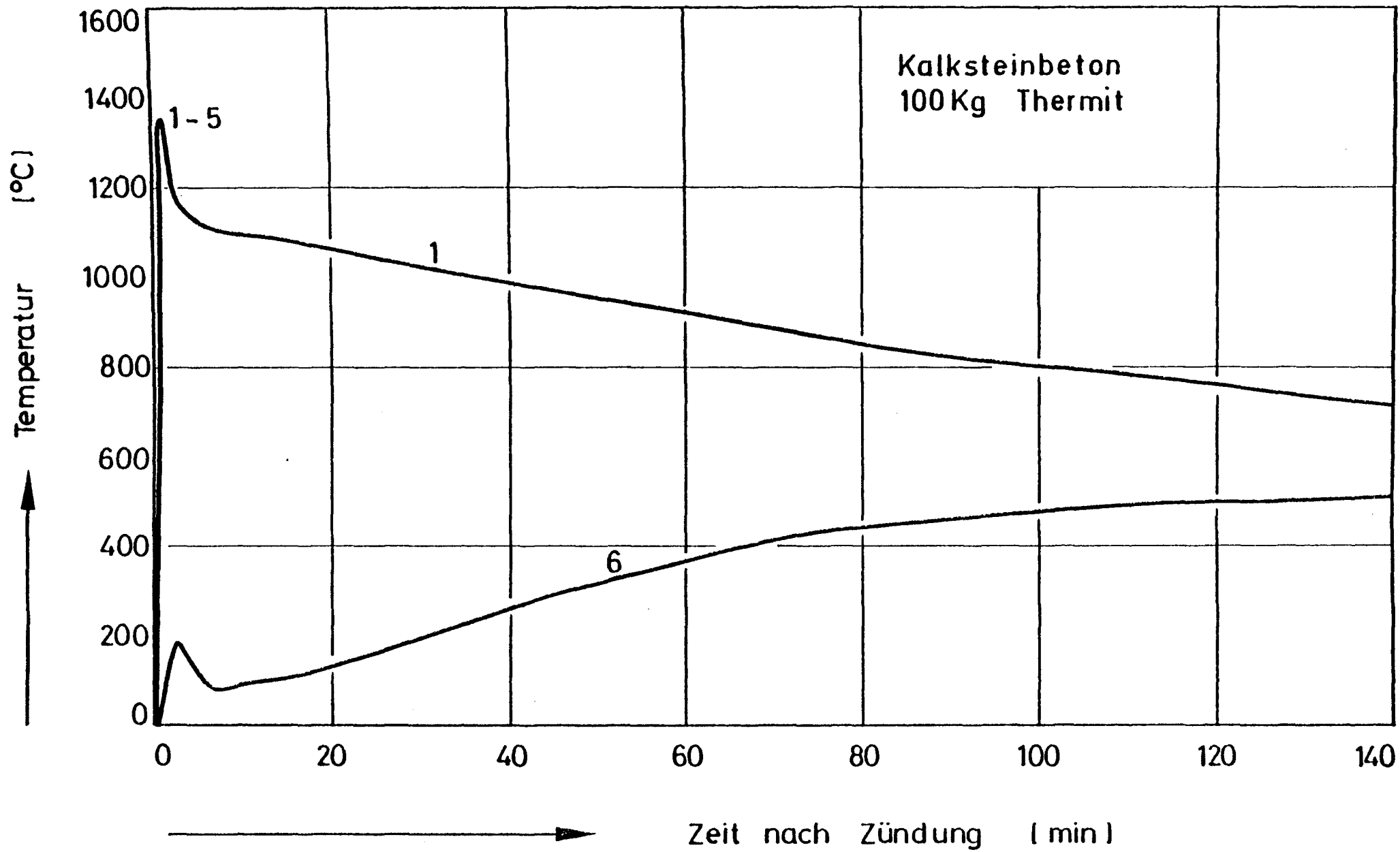
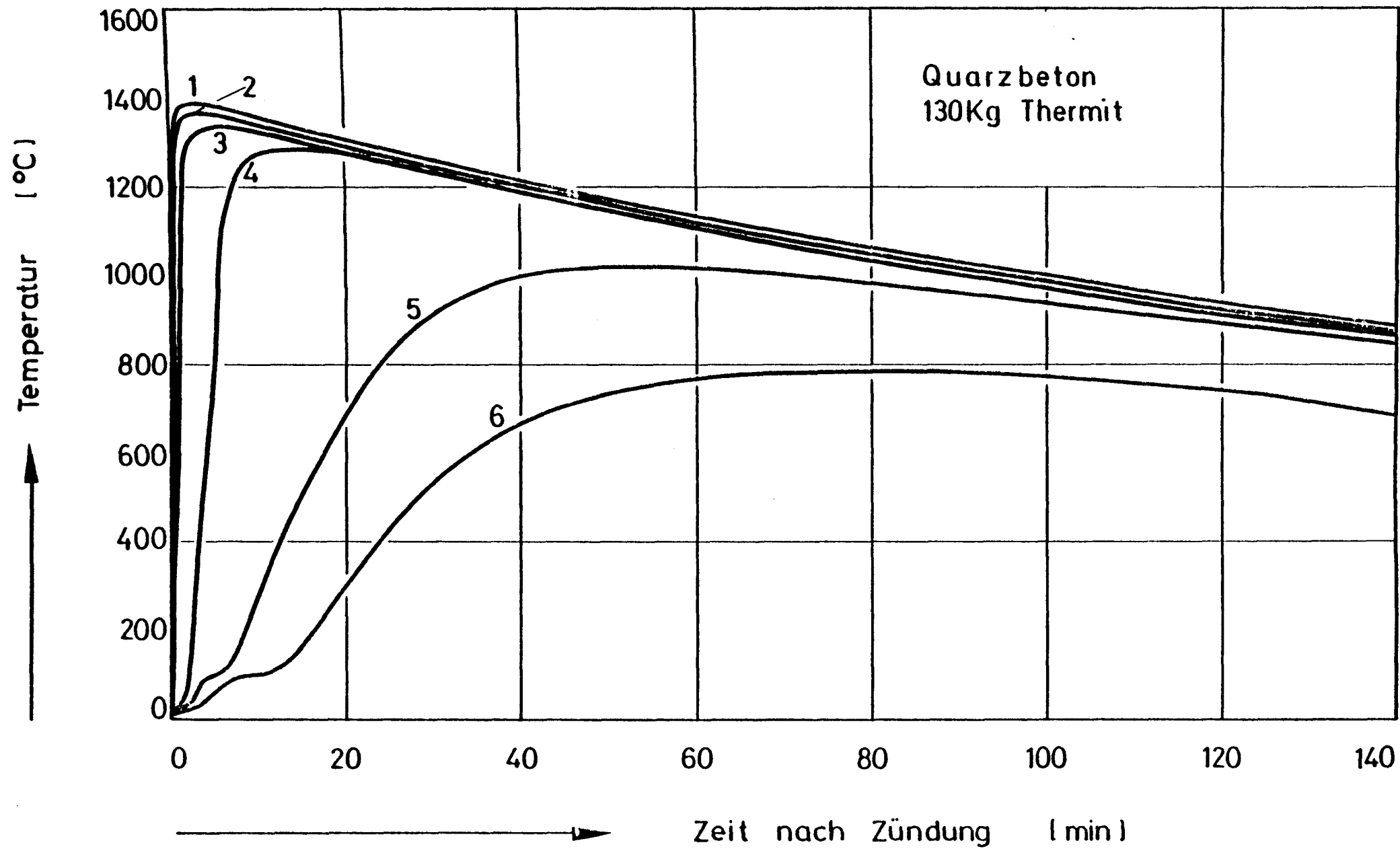


Bild 28: Temperaturentwicklung im Beton :  
Versuch Q2



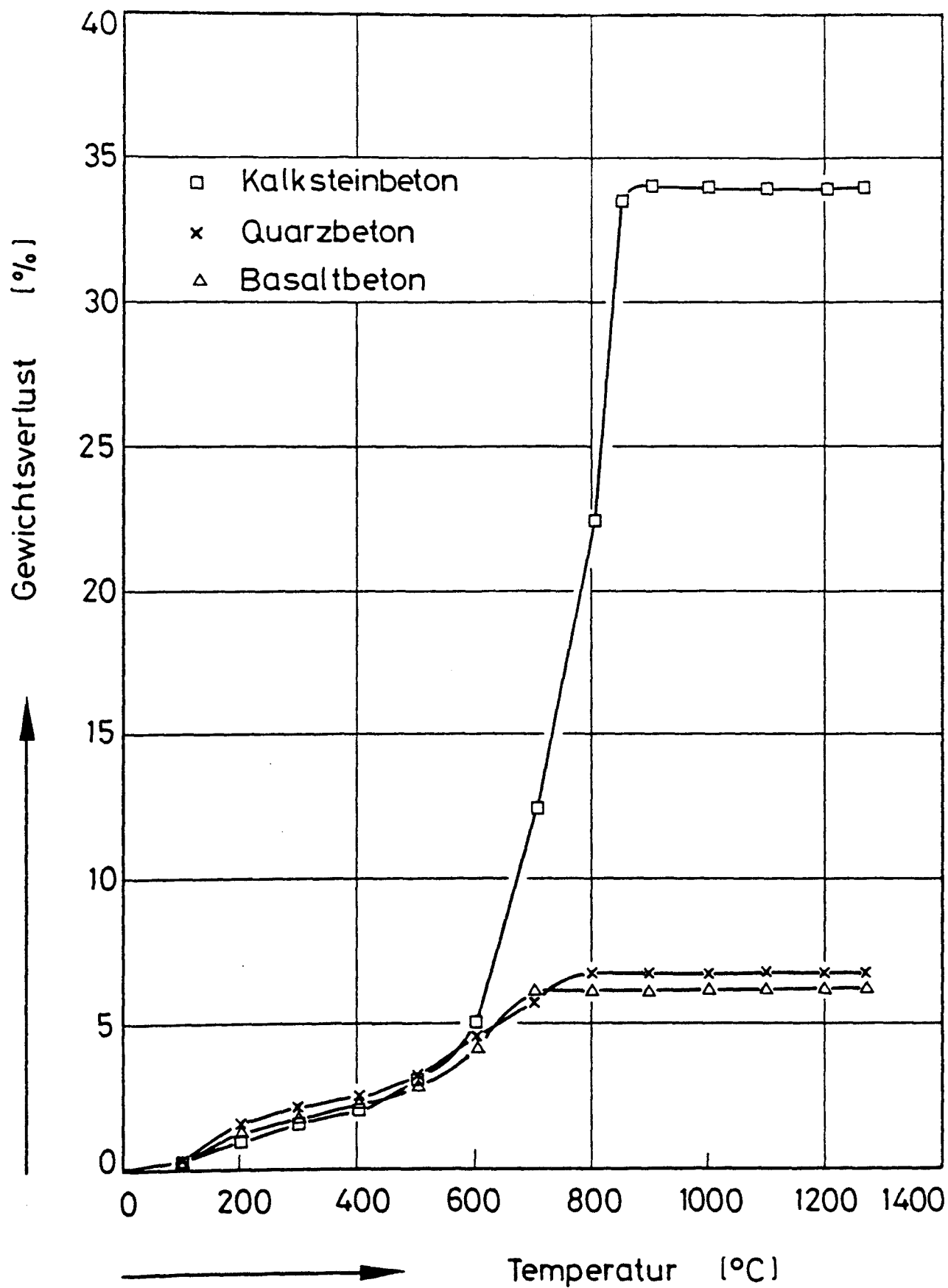
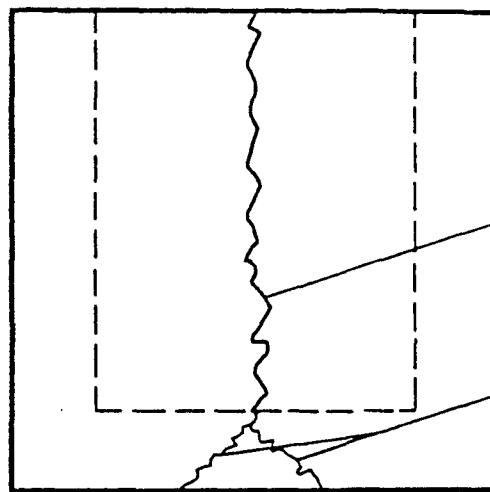


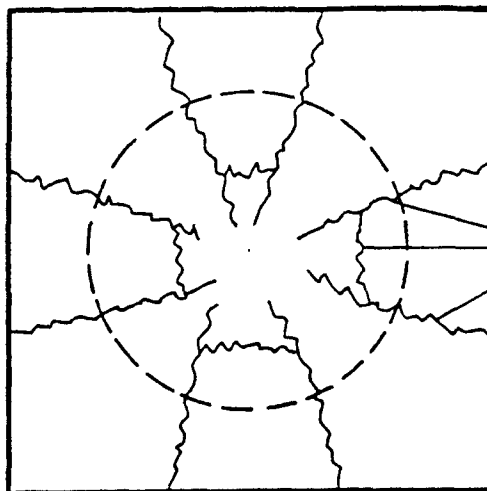
Bild 29: Gewichtsverluste der Thermitbetone



Seitenansicht

breiter Riss  
( 4 mm )

feine Risse  
(1,5 - 2 mm)

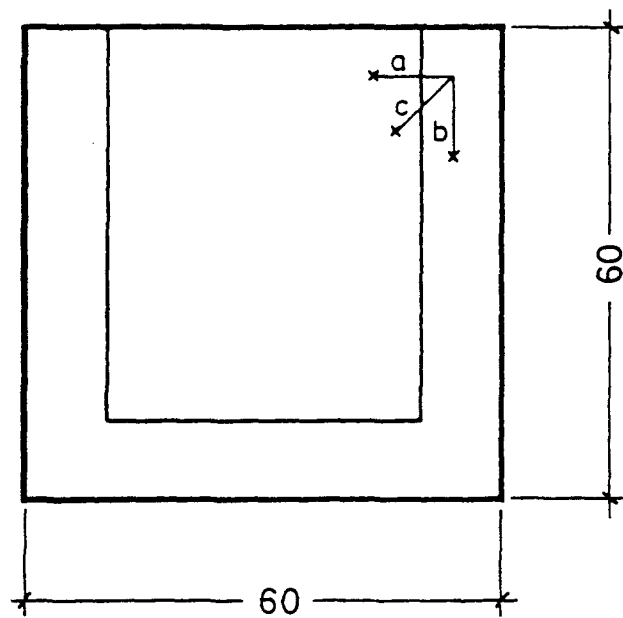


Bodenplatte

feine Risse  
(1,5 - 2 mm)

Bild 30: Risseverteilung im Betontiegel





**Bild 31: Meßstrecken für Setzdehnungsmesser**

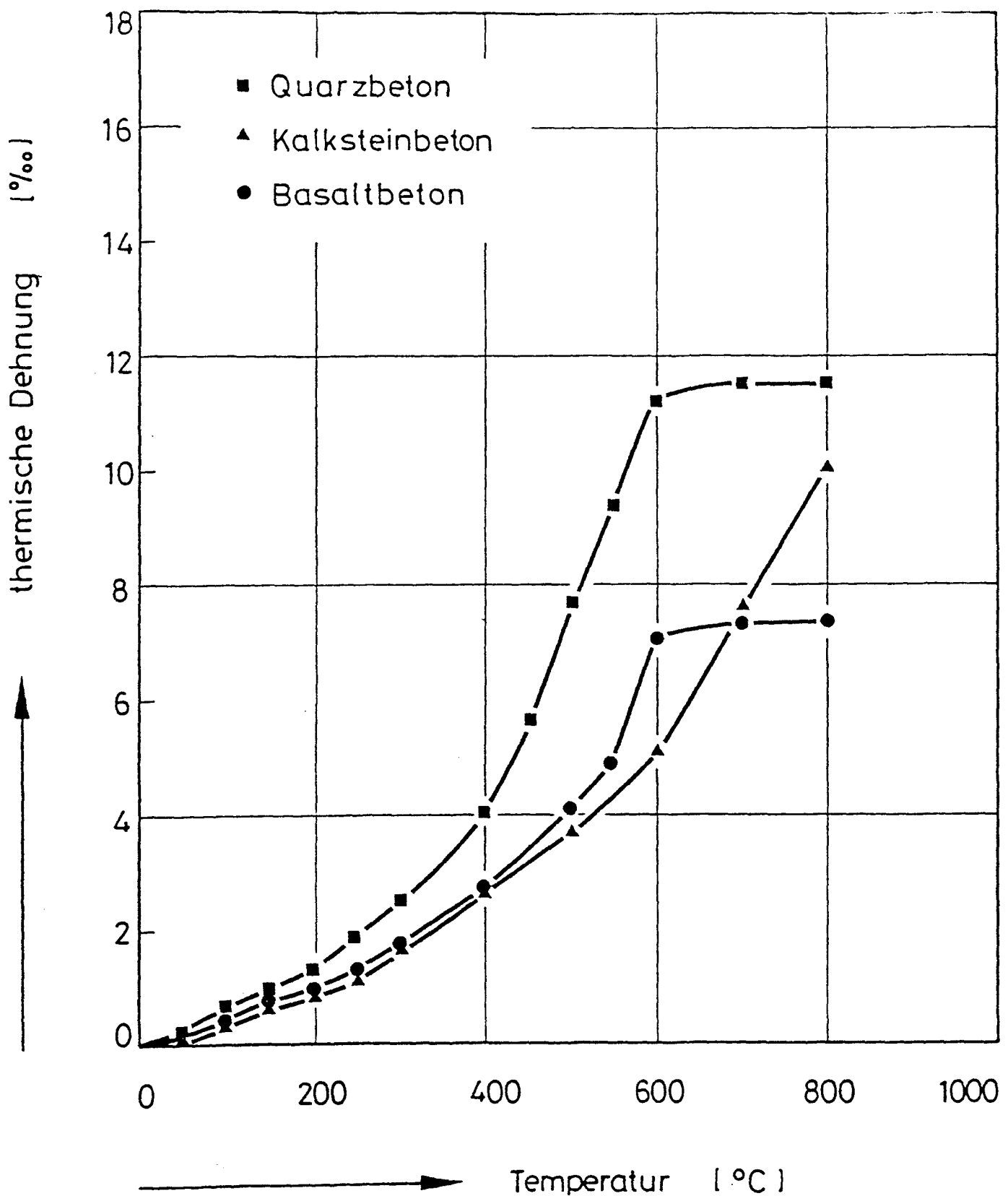


Bild 32: Thermische Dehnung der Thermitbetone

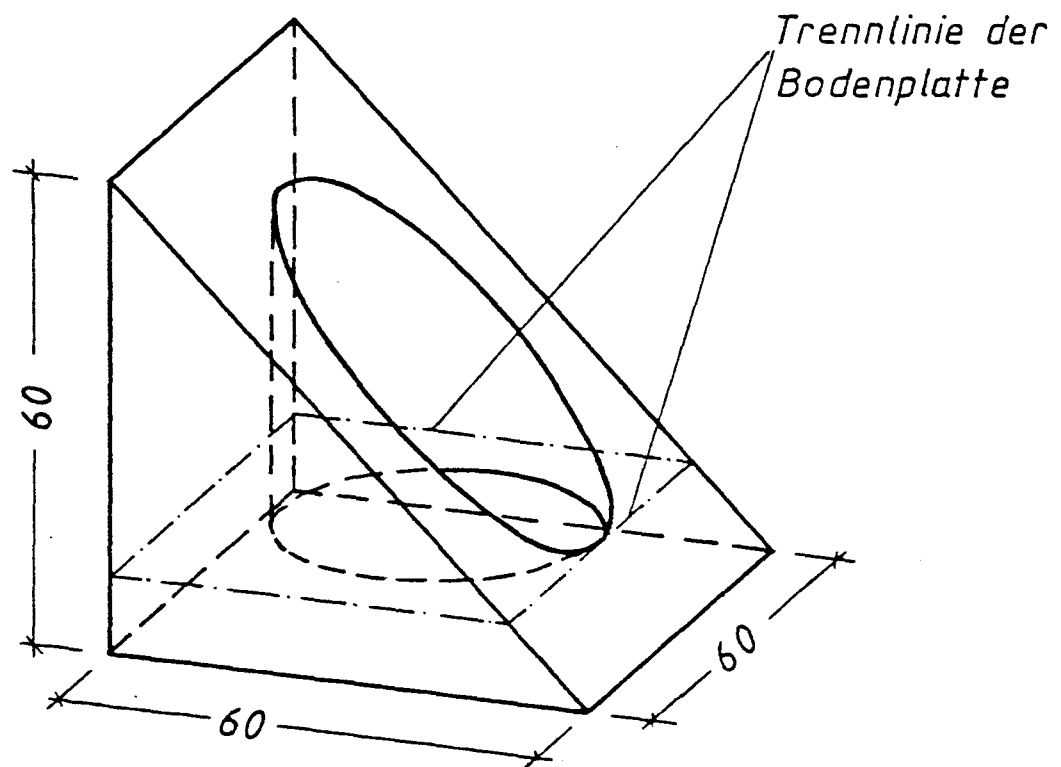
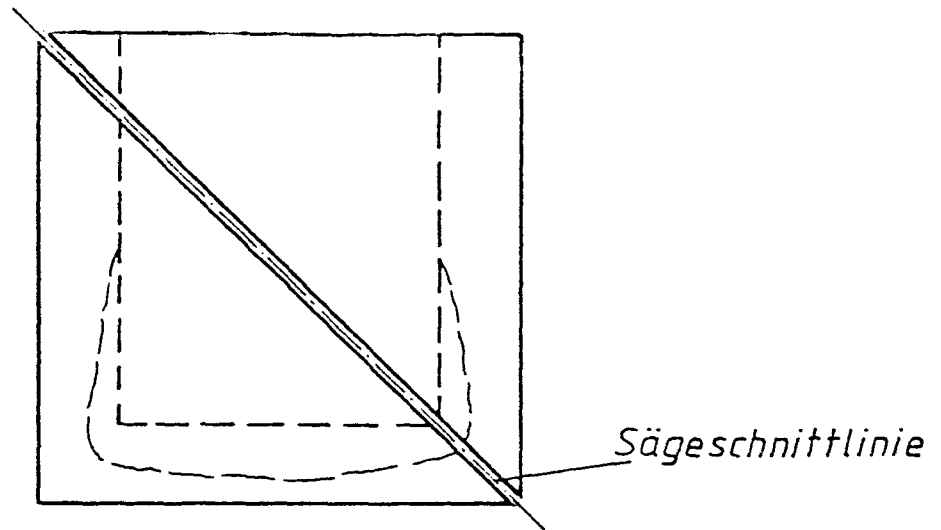
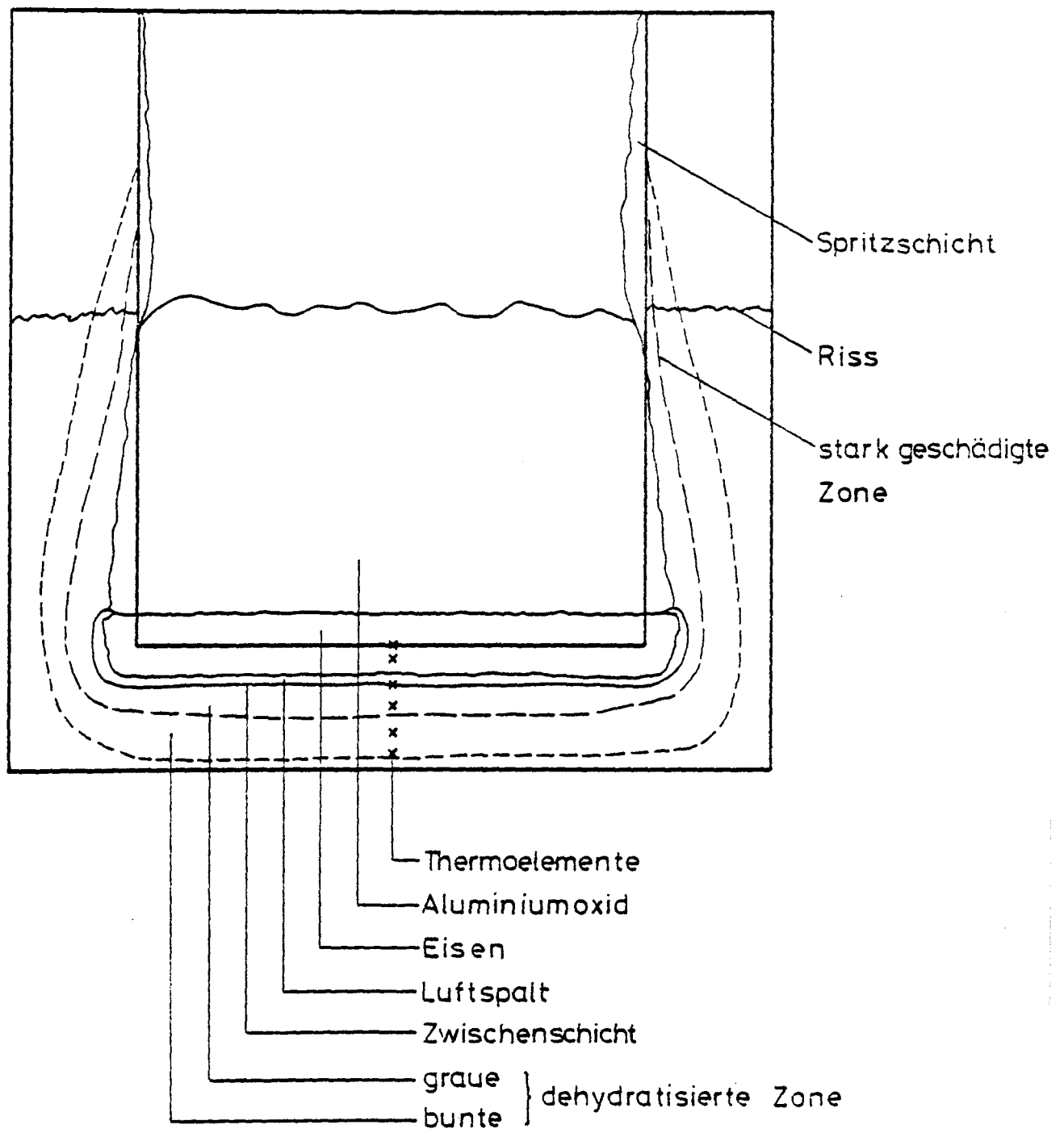


Bild 33: Gesägter Thermitprobekörper



**Bild 34: Schematische Darstellung  
der Tiegelquerschnitte**

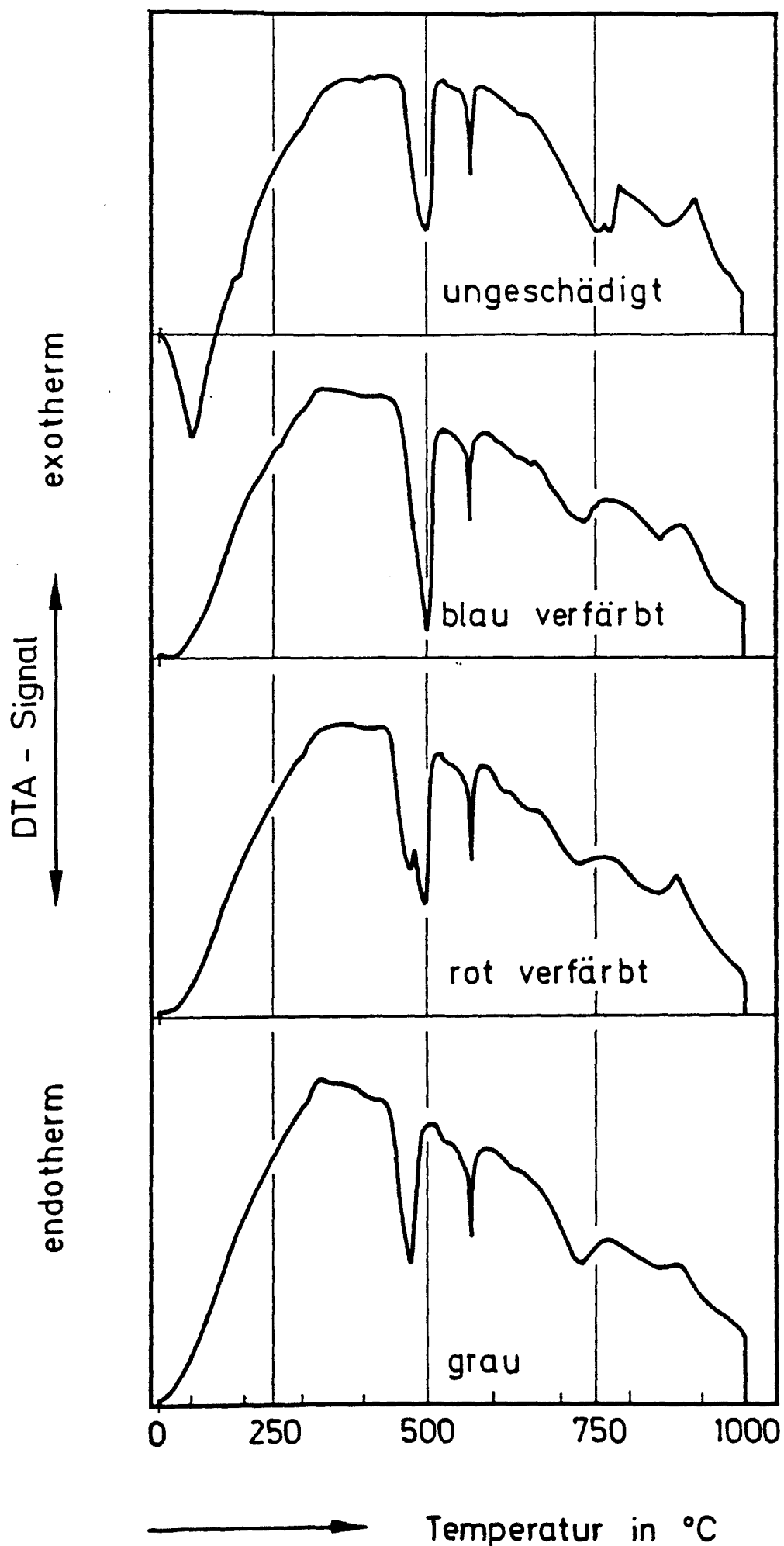
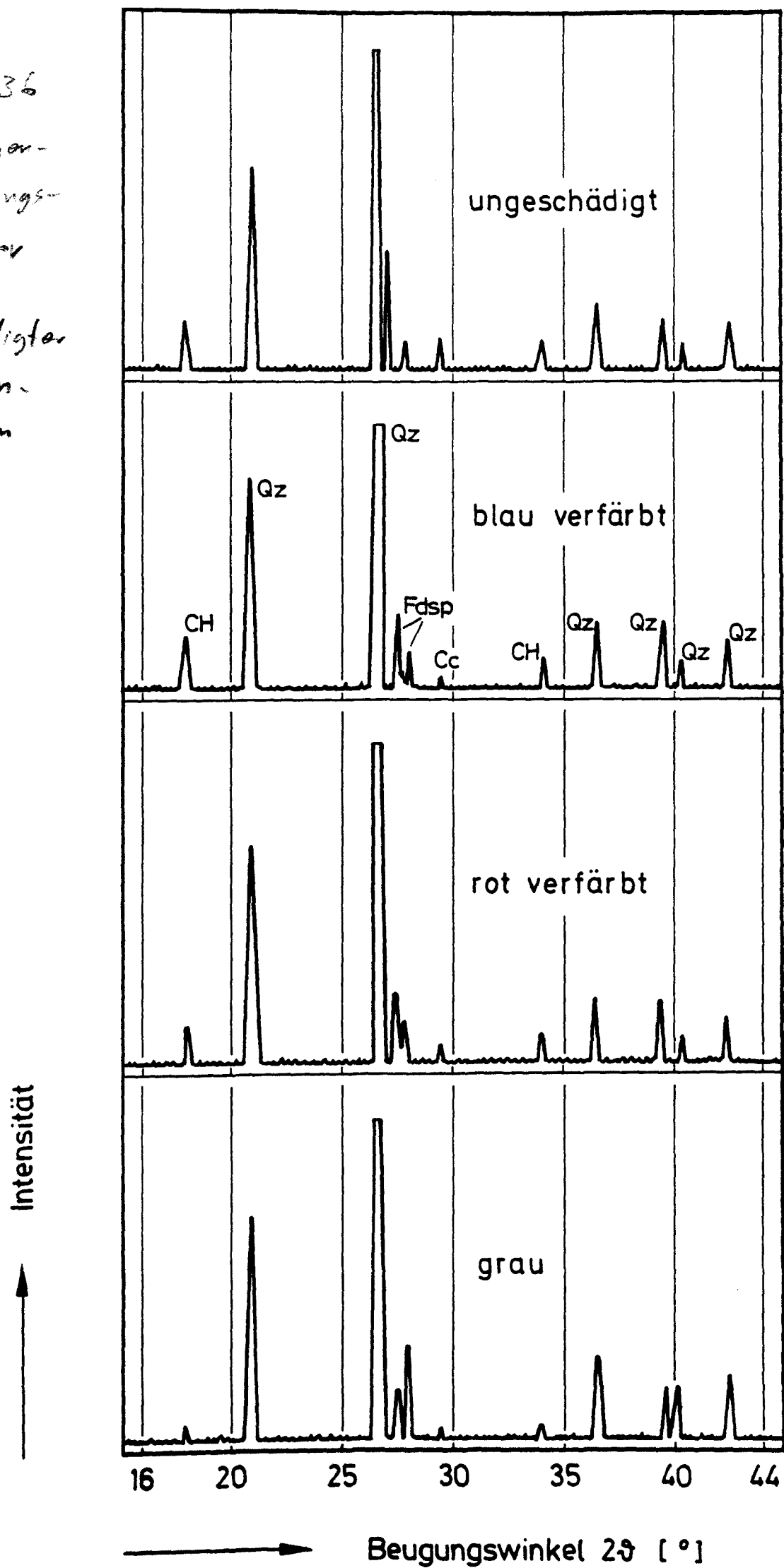


Bild 35: DTA geschädigter Betonzone

Bild 36  
Röntgen-  
beugungs-  
bilder  
ge-  
schädigter  
Beton-  
zonen



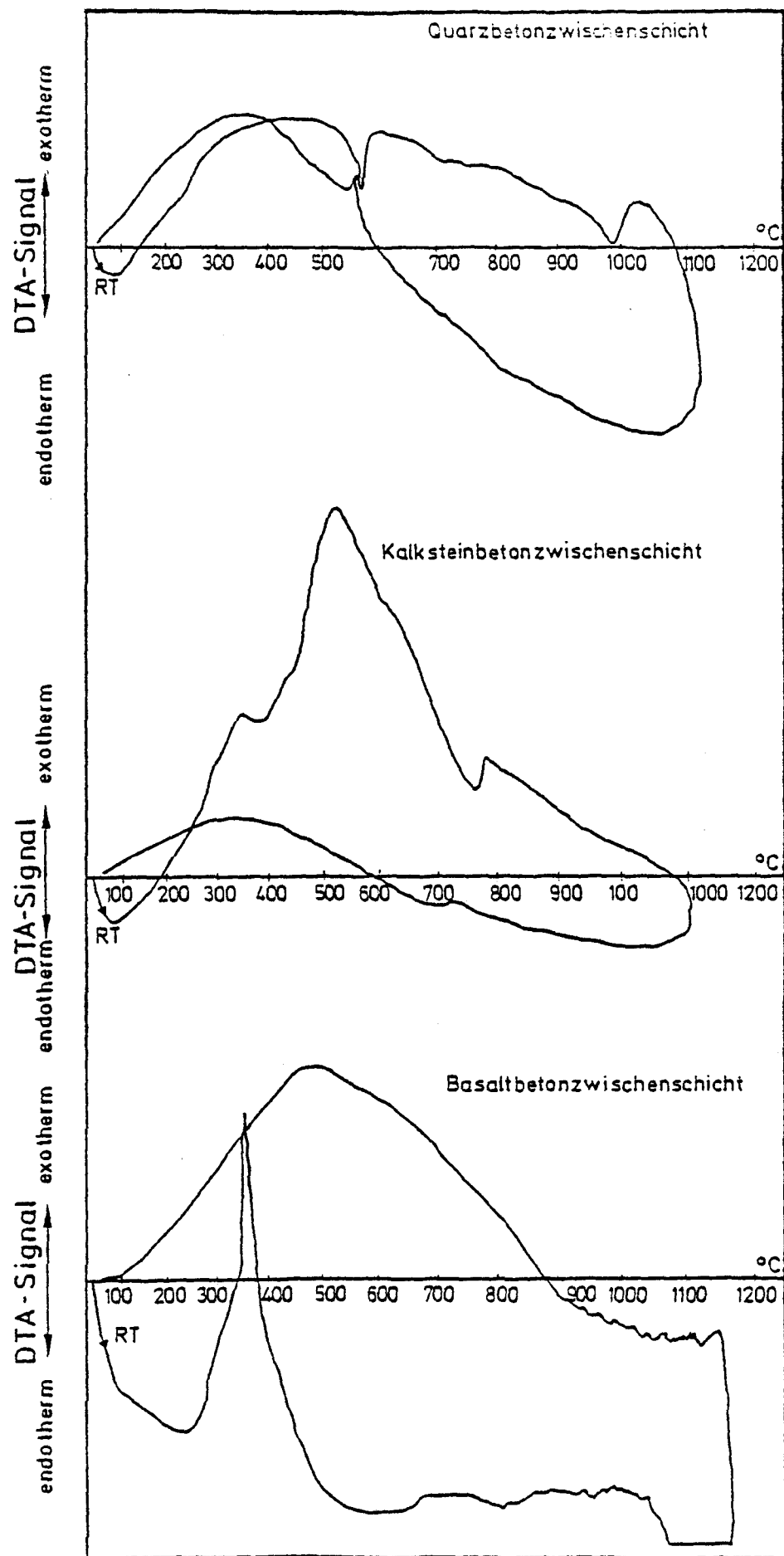
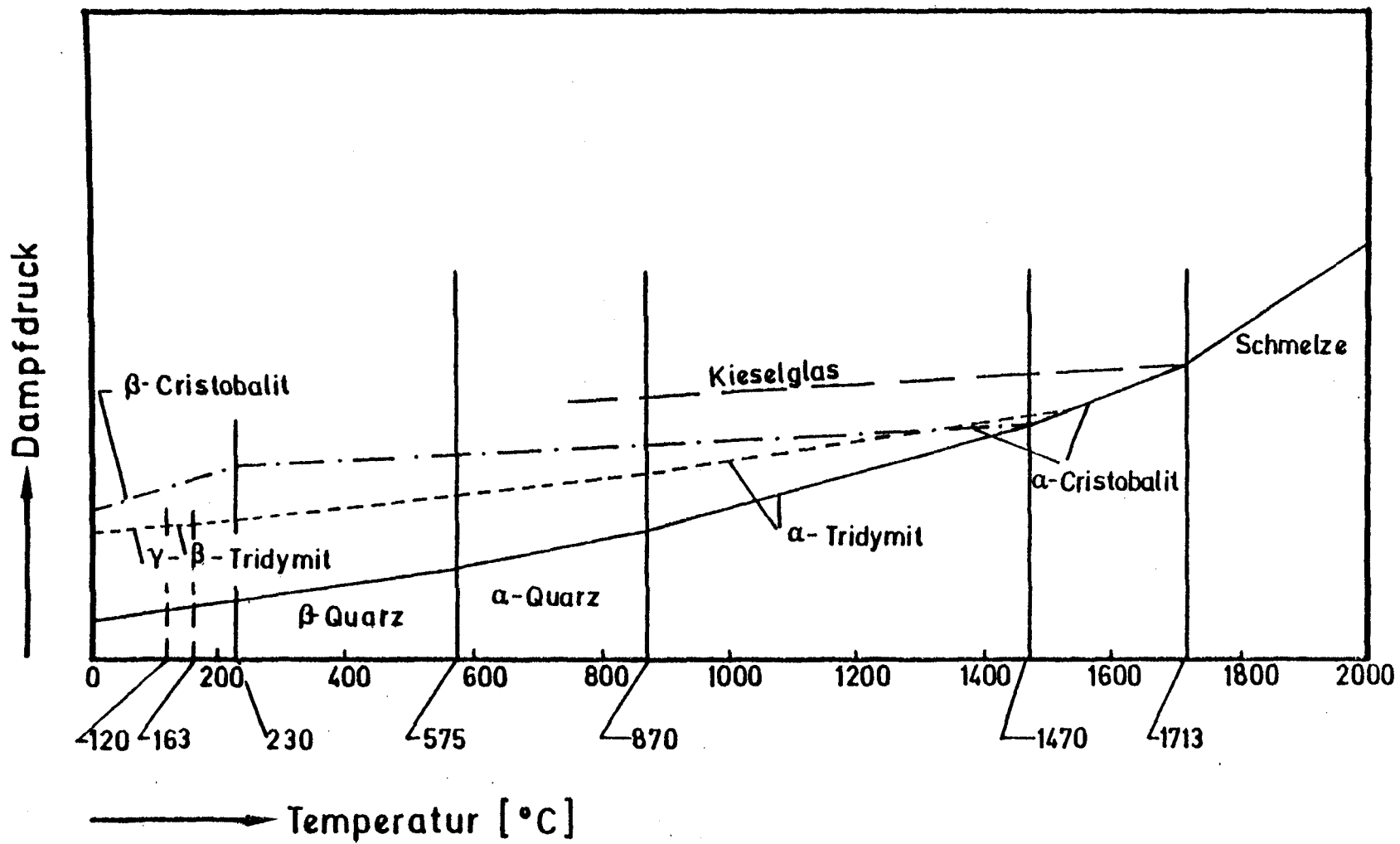


Bild 37: DTA der Zwischenschichten

Bild 38: p-t-Diagramm des Einstoffsystems  $\text{SiO}_2$   
(nach C.N. Fenner)





- Bild 1: DTA von verschiedenen Normalbetonen
- Bild 2: DTA von verschiedenen Normalbetonen
- Bild 3: DTA von verschiedenen Normalbetonen
- Bild 4: DTA von verschiedenen Normalbetonen
- Bild 5: DTA von verschiedenen Normalbetonen
- Bild 6: Temperaturverteilung in einem quarz. Probekörper
- Bild 7: Temperaturentwicklung im zyl. Probekörper
- Bild 8: Temperaturentwicklung im zyl. Probekörper
- Bild 9: Temperaturentwicklung im zyl. Probekörper
- Bild 10: Temperaturentwicklung im zyl. Probekörper
- Bild 12: Temperaturentwicklung im zyl. Probekörper
- Bild 13: Temperaturentwicklung im zyl. Probekörper
- Bild 14: Temperaturentwicklung im zyl. Probekörper
- Bild 15: Probekörper für Thermitversuche
- Bild 16: Schallimpulssummen
- Bild 17: Schallemissionsaktivitäten
- Bild 18: Temperaturentwicklung im Beton : Versuch Q1

Bild 19: Temperaturentwicklung im Beton : Versuch B 1

Bild 20: Temperaturentwicklung im Beton : Versuch B 2

Bild 21: Temperaturentwicklung im Beton : Versuch K 1

Bild 22: Temperaturentwicklung im Beton : Versuch Q 2

Bild 23: Temperaturentwicklung im Beton : Versuch Q 1

Bild 24: Temperaturentwicklung im Beton : Versuch B 1

Bild 25: Temperaturentwicklung im Beton : Versuch B 2

Bild 26: Temperaturentwicklung im Beton : Versuch K 1

Bild 27: Temperaturentwicklung im Beton : Versuch K 2

Bild 28: Temperaturentwicklung im Beton : Versuch Q 2

Bild 29: Gewichtsverluste der Thermitbetone

Bild 30: Risseverteilung im Betontiegel

Bild 31: Meßstrecken für Setzdehnungsmesser

Bild 32: Thermische Dehnung der Thermitbetone

Bild 33: Gesägter Thermitprobekörper

Bild 34: Schematische Darstellung der Tiegelquerschnitte

Bild 35: DTA geschädigter Betonzone

Bild 36: Röntgenbeugungsbilder geschädigter Betonzone

Bild 37: DTA der Zwischenschichten

Bild 38: Existenzbereiche  $\text{SiO}_2$

Bild 11: Temperaturentwicklung im zyl. Probekörper

Bild 38: p-t-Diagramm des Einstoffsystems  $\text{SiO}_2$   
(nach C.N. Fenner)

Verof 1 : 0976

DBBOR : 236

01. April 1985

30-0114